

Bachelorarbeit

Herr

Tino Wagner

**Experimentelle Untersuchung
zur Mikrostrukturierung von
dünnen Metallschichten mit
hochrepetierender Ultrakurz-
puls-Laserstrahlung**

Mittweida, 2015

Fakultät MNI

Bachelorarbeit

Experimentelle Untersuchung zur Mikrostrukturierung von dünnen Metallschichten mit hochrepetierender Ultrakurz- puls-Laserstrahlung

Autor:

Herr

Tino Wagner

Studiengang:

Physikalische Technik

Seminargruppe:

PT012wL-B>

Prüfer:

Prof. Dr.-Ing. Udo Löschner

Einreichung:

Mittweida, 15.Dezember.2015

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2015

Inhalt

Inhalt	I
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	IX
Kurzfassung	XI
Formelverzeichnis	XII
1 Einführung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufgabenstellung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Laserstrahlung-Materie-Wechselwirkung	3
2.2 Verfahren zur Strukturierung dünner Schichten	7
3 Theoretische Vorbetrachtung	9
3.1 Einteilung in Wechselwirkungszonen	9
3.2 Bearbeitungsregime	10
4 Experimentelle Details	12
4.1 Technischer Aufbau	12
4.1.1 Lasergerätetechnik	12
4.1.2 Scanner und Optik	12
4.2 Materialien	13
4.2.1 Optische Eigenschaften	13
4.2.2 Thermo-Physikalische Eigenschaften	14
4.2.3 Ablationsschwellen	15
4.3 Analyseverfahren	16
5 Ergebnisse	18
5.1 Chrom	18
5.1.1 Variation des Pulsabstandes	18
5.1.2 Variation der Frequenz	23
5.1.3 Variation des Linienabstandes	27

5.1.4	Strukturierungsbeispiel.....	30
5.2	<i>Aluminium</i>	31
5.2.1	Variation des Pulsabstandes.....	31
5.2.2	Variation der Frequenz.....	34
5.2.3	Variation des Linienabstandes	38
5.3	<i>Kupfer</i>	40
5.3.1	Variation des Pulsabstandes.....	40
5.3.2	Variation der Frequenz.....	44
5.3.3	Variation des Linienabstandes	47
5.4	<i>Titan</i>	49
5.4.1	Variation des Pulsabstandes.....	49
5.4.2	Variation der Frequenz.....	52
5.4.3	Variation des Linienabstandes	54
6	Zusammenfassung.....	57
	Literaturverzeichnis.....	59
	Anlagen	61
	Anlagen, Teil 1.....	LXIII
	Selbstständigkeitserklärung.....	65

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Temperaturentwicklung im Festkörper unter Anwendung des 2-Temperaturmodells sowie nach klassischer Betrachtung [4]	4
Abbildung 2: Phasendiagramm für Metalle, überhitzte Schmelze kann nur zwischen Binodale und Spinodale [6].....	6
Abbildung 3: Prinzip der Photolithographie mit Positiv und Negativresist [8].....	7
Abbildung 4: Strukturierung einer Schicht B zwischen dem Substrat C und einer Resistschicht A die a) Isotrop oder b) Anisotrop geätzt wurden [8].....	8
Abbildung 5: Links strukturierte Platinschicht rechts Ausschnitt eines Sensors [9]	8
Abbildung 6: Einteilung der verschiedenen Wechselwirkungszonen am Beispiel Chrom ...	9
Abbildung 7: Änderung der Spurbreiten aufgrund verschiedener Fluenzen	11
Abbildung 8: Strahlprofil.....	13
Abbildung 9: Änderung des Reflexionsgrades und des Absorptionskoeffizienten unter Einwirkung eines 100 fs Pulses [12].....	14
Abbildung 10: Beispiel für Linienabtrag, der nicht Kriterien für Zone 3 erfüllt	17
Abbildung 11: Beispiel für Linienabtrag, der die Kriterien für Zone 3 erfüllt	17
Abbildung 12: Beispiel für Linienabtrag der nicht Kriterien für Zone 2 erfüllt	17
Abbildung 13: Beispiel für Linienabtrag, der die Kriterien für Zone 1 (blau) sowie Zone 2 (rot) erfüllt	17
Abbildung 14: Abschätzung der möglichen Spurbreiten in Abhängigkeit von der Fluenz mittels der Formel (4) und den Schwellfluenzen für Einzelpulse von Chrom.....	18
Abbildung 15: Spurbreite der Zone 1 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Pulsabständen, Frequenz 32 kHz, Linienabstand 200 µm, Pulsdauer 200 fs.....	20

Abbildung 16: Spurbreite der Zone 2 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Pulsabständen, Frequenz 32 kHz, Linienabstand 200 µm, Pulsdauer 200 fs.....	21
Abbildung 17: Spurbreite der Zone 3 in Abhängigkeit der Fluenzen, Frequenz 32 kHz, Linienabstand 200 µm, Pulsdauer 200 fs	22
Abbildung 18: Riffelrückstände in der Spur statt Schmelzkugeln, Pulsabstand 1 µm, Frequenz 32 kHz, Pulsdauer 200 fs Fluenz 0,32 J/cm²	23
Abbildung 19: Spurbreite der Zone 2 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Frequenzen, Linienabstand 200 µm, Pulsdauer 200 fs, Pulsabstand 4 µm	25
Abbildung 20: Spurbreite der Zone 2 und 3 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Frequenzen, Linienabstand 200 µm, Pulsdauer 200 fs, Pulsabstand 2 µm	26
Abbildung 21: Spurbreite der Zone 2 und 3 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Frequenzen, Linienabstand 200 µm, Pulsdauer 200 fs, Pulsabstand 1 µm	26
Abbildung 22: REM-Übersichtsbild eines flächigen Abtrags.....	29
Abbildung 23: REM-Bild vom Rand des flächigen Abtrags.....	29
Abbildung 24: Abschätzung der möglichen Spurbreiten in Abhängigkeit von der Fluenz mittels der Formel (4) und den Schwellfluenzen für Einzelpulse von Aluminium.....	31
Abbildung 25: Spurbreite der Zone 2 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Pulsabständen, Frequenz 32 kHz, Linienabstand 200 µm, Pulsdauer 200 fs.....	33
Abbildung 26: Spurbreite der Zone 3 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Pulsabständen, Frequenz 32 kHz, Linienabstand 200 µm, Pulsdauer 200 fs.....	34
Abbildung 27: Spurbreite der Zone 2 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Frequenzen, Linienabstand 200 µm, Pulsdauer 200 fs, Pulsabstand 4 µm	36
Abbildung 28: Spurbreite der Zone 2 und 3 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Frequenzen, Linienabstand 200 µm, Pulsdauer 200 fs, Pulsabstand 2 µm	37
Abbildung 29: Spurbreite der Zone 2 und 3 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Frequenzen, Linienabstand 200 µm, Pulsdauer 200 fs, Pulsabstand 1 µm	37

Abbildung 30: Abschätzung der möglichen Spurbreiten in Abhängigkeit von der Fluenz mittels der Formel (4) und den Schwellfluenzen für Einzelpulse von Kupfer	41
Abbildung 31: Bildung von Schmelzpool Pulsabstand 10 μm , Frequenz 32 kHz, Fluenz 1,4 J/cm ² , Pulsdauer 200 fs	43
Abbildung 32: Bildung von Auswurfspitzen Pulsabstand 10 μm , Frequenz 32 kHz, Fluenz 1,6 J/cm ² , Pulsdauer 200 fs	43
Abbildung 33: Spurbreite der Zone 2 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Pulsabständen, Frequenz 32 kHz, Linienabstand 200 μm , Pulsdauer 200 fs	43
Abbildung 34: Spurbreite der Zone 2 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Frequenz, Pulsabstand 4 μm , Linienabstand 200 μm , Pulsdauer 200 fs	45
Abbildung 35: Spurbreite der Zone 2 und 3 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Frequenz, Pulsabstand 2 μm , Linienabstand 200 μm , Pulsdauer 200 fs ..	46
Abbildung 36: Spurbreite der Zone 2 und 3 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Frequenz, Pulsabstand 1 μm , Linienabstand 200 μm , Pulsdauer 200 fs ..	47
Abbildung 37: Abschätzung der möglichen Spurbreiten der Zonen 2 und 3 in Abhängigkeit von der Fluenz mittels der Formel (4) und den Schwellfluenzen für Einzelpulse von Titan	49
Abbildung 38: Spurbreite der Zone 2 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Pulsabständen, Frequenz 32 kHz, Linienabstand 200 μm , Pulsdauer 200 fs	51
Abbildung 39: Spurbreite der Zone 3 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Pulsabständen, Frequenz 32 kHz, Linienabstand 200 μm , Pulsdauer 200 fs	52
Abbildung 40: Spurbreite der Zone 2 und 3 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Frequenz, Pulsabstand 4 μm , Linienabstand 200 μm , Pulsdauer 200 fs ..	53
Abbildung 41: Spurbreite der Zone 2 und 3 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Frequenz, Pulsabstand 1 μm , Linienabstand 200 μm , Pulsdauer 200 fs ..	54
Abbildung 42: flächiger Abtrag von Titan mit einem Pulsabstand von 8 μm und einer Fluenz von 0,9 J/cm ²	56

Abbildung 43 LIU-Plot für Chrom, Quadrat der Spurbreite der Zone 1 gegenüber der zugehörigen logarithmisch aufgetragenen Fluenz, gestrichelte Linie ist Schwellfluenz der Zone 1 für Einzelpulse, Frequenz 32 kHz, Linienabstand 200µm, Pulsdauer 200 fs LXIII

Abbildung 44 LIU-Plot für Chrom, Quadrat der Spurbreite der Zone 2 gegenüber der zugehörigen logarithmisch aufgetragenen Fluenz, gestrichelte Linie ist Schwellfluenz der Zone 2 für Einzelpulse, Frequenz 32 kHz, Linienabstand 200µm, Pulsdauer 200 fs LXIII

Abbildung 45 LIU-Plot für Chrom, Quadrat der Spurbreite der Zone 3 gegenüber der zugehörigen logarithmisch aufgetragenen Fluenz, Frequenz 32 kHz, Linienabstand 200µm, Pulsdauer 200 fs.....LXIV

Abbildung 46 LIU-Plot für Aluminium, Quadrat der Spurbreite der Zone 2 gegenüber der zugehörigen logarithmisch aufgetragenen Fluenz, gestrichelte Linie ist Schwellfluenz der Zone 2 für Einzelpulse, Frequenz 32 kHz, Linienabstand 200µm, Pulsdauer 200 fsLXIV

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Laserparameter.....	12
Tabelle 2: Dicke der Metallschichten.....	13
Tabelle 3: relevante optische Eigenschaften der Metallschichten [11].....	13
Tabelle 4: relevante thermische Eigenschaften der Metallschichten	15
Tabelle 5: Ablationsschwellen für Einzelpulse der Zonen 1 bis 3 der untersuchten Schichtmaterialien.....	15
Tabelle 6: Übersicht der Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Pulsabständen in Abhängigkeit der Fluenz bei einer Pulswiederholfrequenz von 32 kHz und einem Linienabstand von 200 µm	19
Tabelle 7: Übersicht der Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Frequenzen in Abhängigkeit des Pulsabstandes bei einer Fluenz von 0,64 J/cm ² , einer Pulsdauer von 200 fs und einem Linienabstand von 200 µm	24
Tabelle 8: Übersicht der Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Linienabständen in Abhängigkeit der Fluenz bei einem Pulsabstand 1 µm und einer Frequenz von 200 kHz	28
Tabelle 9: Darstellung der a) unidirektionalen- , b) bidirektionalen Bearbeitungsergebnisse	30
Tabelle 10: Übersicht der Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Pulsabständen in Abhängigkeit der Fluenz bei einer Pulswiederholfrequenz von 32 kHz und einem Linienabstand von 200 µm	32
Tabelle 11: Übersicht der Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Frequenzen in Abhängigkeit des Pulsabstandes bei einer Fluenz von 0,72 J/cm ² , einer Pulsdauer von 200 fs und einem Linienabstand von 200 µm	35
Tabelle 12: Übersicht der Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Linienabständen in Abhängigkeit der Fluenz bei einem Pulsabstand 1 µm und einer Frequenz von 1 MHz ...	39

Tabelle 13: Übersicht der Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Pulsabständen in Abhängigkeit der Fluenz bei einer Pulswiederholfrequenz von 32 kHz und einem Linienabstand von 200 μm41

Tabelle 14: Übersicht der Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Frequenzen in Abhängigkeit des Pulsabstandes bei einer Fluenz von 1,6 J/cm², einer Pulsdauer von 200 fs und einem Linienabstand von 200 μm44

Tabelle 15: Übersicht der Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Linienabständen in Abhängigkeit der Fluenz bei einem Pulsabstand 2 μm und einer Frequenz von 1 MHz ...48

Tabelle 16: Übersicht der Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Pulsabständen in Abhängigkeit der Fluenz bei einer Pulswiederholfrequenz von 32 kHz und einem Linienabstand von 200 μm50

Tabelle 17 Übersicht der Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Frequenzen in Abhängigkeit des Pulsabstandes bei einer Fluenz von 0,9 J/cm², einer Pulsdauer von 200 fs.....52

Tabelle 18 Übersicht der Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Linienabständen in Abhängigkeit der Fluenz bei einem Pulsabstand 1 μm und einer Frequenz von 1 MHz ...55

Kurzfassung

Um die Vorteile eines hochrepetierenden Ultrakurzpulslasers zur Strukturierung von dünnen Metallschichten nutzen zu können, sind Kenntnisse über den Einfluss der verschiedenen Parameter notwendig. Deshalb wurden der Einfluss des Pulsabstands, der Frequenz und des Linienabstands, auf das Ablationsverhalten von dünnen Metallschichten untersucht. Es wurden die Schichtmaterialien Chrom, Aluminium, Kupfer und Titan ausgewählt, deren Schichtdicken sich in einem Bereich von $0,02\text{ }\mu\text{m}$ bis $0,5\text{ }\mu\text{m}$ bewegen. Die Untersuchungen der Einflussnahme des Pulsabstandes wurden bei einer Frequenz von 32 kHz durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass sich die Spurbreite bei kleiner werdendem Pulsabstand, bei fast allen Schichtmaterialien vergrößerte. Belegt wurde dabei, dass bei dieser Frequenz nicht bei allen Schichten ein sauberer Abtrag, bis auf das Substrat, realisiert werden konnte. Dazu wurde als nächstes die Frequenz variiert. Es konnte festgestellt werden, dass bei Erhöhung der Frequenz, die Spurbreite nur bei Aluminium und Kupfer, merklich zunahm. Dabei zeigte sich, dass bei Chrom, mit höheren Frequenzen als 200 kHz , sich Risse im Substrat bilden. Anschließend wurden mit geeigneten Parametern die Auswirkungen des Linienabstandes untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass der Abstand zwischen zwei Linien sich nicht auf die Breite der Einzellinie auswirkt. Die Flächenabtragsrate war bei Titan am größten, was auf die sehr geringe Schichtdicke und der geringen Wärmeleitung von Titan zurückzuführen ist.

Formelverzeichnis

P_d Pulsabstand

λ Wellenlänge

f Frequenz

τ Pulsdauer

P_{av} Mittlere Leistung

M^2 Beugungsmaßzahl

H Fluenz

H_{th} Schwellfluenz

1 Einführung

1.1 Motivation

In meinem Bachelorstudium wurde mir klar, dass die Lasertechnik trotz einer großen Menge von bereits gewonnenen Erkenntnissen eine noch recht junge Wissenschaft ist. Die Lasertechnik findet bereits vielfach Verwendung im traditionellen Maschinenbau, z.B. zum Schneiden und Schweißen von Vollmaterial. Aufgrund ihrer einzigartigen Eigenschaften wird sie aber auch zunehmend zur Herstellung hochkomplexer (Sub-)mikrostrukturen genutzt, was der Technologie eine Vielzahl neuer Anwendungen erschließt. Zudem lässt die Steigerung der Effizienz neuer Lasieranlagen darauf schließen, dass viele bestehende Anwendungsverfahren zukünftig von einer Lasertechnik abgelöst werden. Aber auch die Tatsache, dass mit einem Laser bisher unerreichte Energien auf kleinstem Raum, bei einer berührungslosen Bearbeitung, erreicht wurden, stellt die Basis für neue Technologien. Ein sehr zukunftssträchtiges Verfahren stellt die Strukturierung von dünnen Schichten dar. Die Vorteile von dünnen Schichten sind dabei vielfältig und, z.B. in der Elektronik, deshalb unverzichtbar geworden, zum einen ökologisch und ökonomisch, durch den geringen Verbrauch von wertvollen Ressourcen, zum andern durch die Realisierung von Strukturgrößen im Mikrometerbereich. Mein Interesse für dieses Teilgebiet der Laserbearbeitung wurde bereits während meiner Arbeit als Hilfwissenschaftler im Laserinstitut Mittweida geweckt und hat mich bewogen, diese Technologie, innerhalb meiner Bachelorarbeit, intensiver zu erforschen und weiter zu entwickeln.

1.2 Aufgabenstellung

Um dünne Metallschichten mit einem hochrepetierenden Ultrakurzpulslaser strukturieren zu können ist eine kurze geometrische Distanz zwischen den Einzelpulsen notwendig um das Schichtmaterial bis auf das Substrat zu ablatieren. Durch das Verringern des Pulsabstandes kann sich allerdings das Ablationsverhalten, aufgrund von Wärmeleitung, im Vergleich zum Einzelpuls, ändern. Insbesondere bei dünnen Schichten ist die Wärmeleitung in die Tiefe eingeschränkt, weshalb sich die Wärme nur lateral in ihr ausbreitet und zu Veränderungen des Schichtabtrags führen kann. Außerdem kann eine Verringerung des zeitlichen Abstands zwischen den Einzelpulsen eine ähnliche Änderung des Ablationsverhaltens hervorrufen. Um einen flächigen Abtrag des Schichtmaterials zu realisieren müssen mehrere Linien nahe bei einander ablatiert werden was auch zu einer Veränderung des Schichtabtrags führen kann. Diese Bachelorarbeit untersucht deshalb den Einfluss

des Pulsabstandes, der Pulswiederholfrequenz und des Linienabstandes auf das Ablatieren einer dünnen Metallschicht mit einem Ultra-kurzpulslaser. Die Auswirkungen der verschiedenen Parameter werden dabei z.B. auf die Breite eines Linienabtrags und ein möglichen Aufwurf untersucht. Dadurch können optimale Parametersätze gefunden werden, um ein schnellen Schichtabtrag zu erzielen ohne das Substrat dabei zu beschädigen. Der Einfluss der Parameter ist abhängig vom Material und der Dicke der Schicht, weshalb mit vier verschiedenen Metallen unterschiedlicher Schichtdicke Untersuchungen durchgeführt werden.

2 Stand der Technik

2.1 Laserstrahlung-Materie-Wechselwirkung

Die Lasermaterialbearbeitung mit ultrakurzen Pulsen im Piko- und Femtosekundenbereich unterscheidet sich deutlich von der Bearbeitung mit längeren Pulsdauern. In diesen extrem kurzen Zeitbereich wird die eingestrahlte optische Energie von den Elektronen aufgenommen und erst nach Ende der Bestrahlung auf das Gitter übertragen. Eine Möglichkeit, die in der sehr kurzen Zeit stattfindenden Energieübertragsmechanismen zu erklären wurde durch die Einführung eines 2-Temperaturmodells geschaffen. In diesem Modell werden den Elektronen und dem Gitter jeweils nach Anregungsgrad und erfolgtem Energietransport unterschiedliche Temperaturen zugeordnet, die über die zwei gekoppelten Differenzialgleichungen (1) für das Elektronengas sowie (2) für das Gitter berechnet werden können [1]. In Gleichung (2) wurde die Energiediffusion des Gitters nicht berücksichtigt, da diese in den kurzen Zeiträumen vernachlässigbar ist [1].

Energiedichte	Energie Diffusion		Elektron- Phonon- Kopplung		optische Anregung	
$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} =$	$\frac{\partial}{\partial z} K_e \frac{\partial T_e}{\partial z}$	–	$g(T_e - T_g)$	+	$S_{(z,\tau)}$	(1)
$C_g \frac{\partial T_g}{\partial t}$			$g(T_e - T_g)$			(2)

C_e steht für die volumetrische Wärmekapazität des Elektronengases und C_g für die volumetrische Wärmekapazität des Gitters. K_e steht für die Wärmeleitfähigkeit der Elektronen und $S_{(z,\tau)}$ für die eingekoppelte Laserenergie. Die zwei Temperaturen sind über die Elektron-Phonon-Kopplung mit einander Verbunden und streben ein thermisches Gleichgewicht an. Der Kopplungsfaktor g lässt mittels der Formel (3) berechnen [1].

$$g = \frac{\pi^2 m_e n_e c_s^2}{6 \tau_e (T_e) T_e(\tau, z)} \quad (3)$$

In der Gleichung [3] steht m_e für die Masse eines Elektrons, n_e für die Dichte der freien Elektronen und τ_e für die Elektronenrelaxationszeit. Die eingestrahlte Energie wird zuerst lokal im Bereich der optischen Eindringtiefe, von den leicht beweglichen Elektronen aufgenommen. Aufgrund der sehr kurzen Einwirkzeit der Strahlung kann fast die gesamte Energie von den Elektronen aufgenommen werden. Über Stoßvorgänge der Elektronen untereinander verteilt sich die Energie im Elektronengas. Anschließend überträgt das angeregte Elektronengas seine Energie über die Elektron-Phonon-Kopplung auf das Gitter bis sich ein thermisches Gleichgewicht einstellt. Überschreitet das Gitter dabei eine kritische Temperatur kommt es zu einem Phasenübergang ins Gasförmige oder gar zu einer Plasmabildung. Diese Temperaturentwicklung des Gitters ist dabei unabhängig von der Pulsdauer, sondern wird nur über Elektron-Phonon-Kopplung bestimmt. Die Temperaturentwicklung der Elektronen und des Gitters sind in Abbildung 1 beispielhaft dargestellt. Ebenfalls wird das klassische Modell zum Vergleich dargestellt. Allerdings treten auch beim 2-Temperaturmodell Abweichungen zu experimentellen Versuchen auf. Zum einen ist eine Temperaturabhängigkeit des Kopplungsfaktors aus Gleichung (3) zu erkennen. Zum andern kann es zum Überhitzen in der festen Phase kommen. Betrachtet man eine begrenzte Region auf der Oberfläche kann es ausgelöst durch den extrem schnellen Temperaturanstieg, zur Bildung von Druckwellen kommen, die zu einer Absplitterung des Materials führen können. [1] [2] [3]

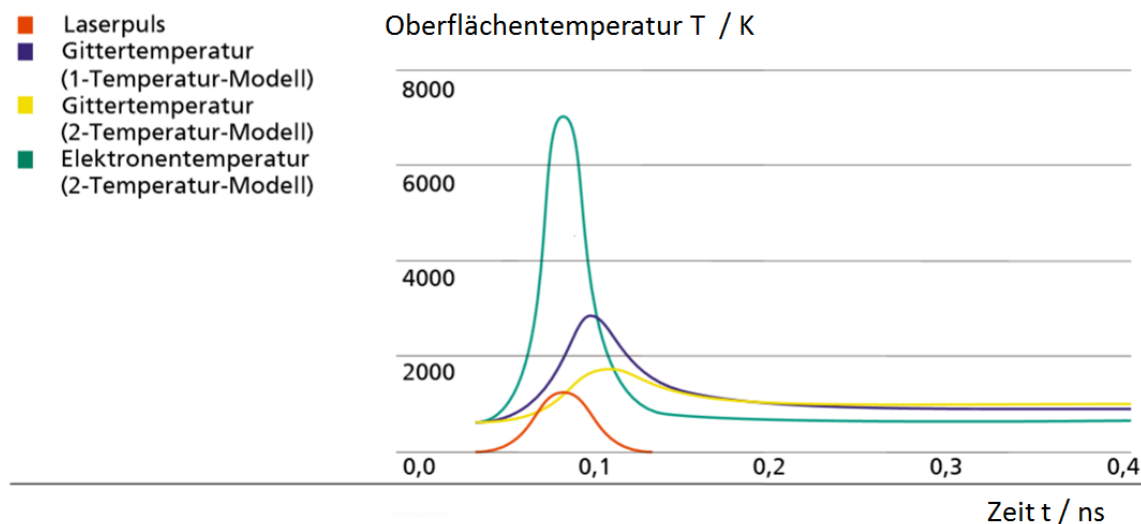


Abbildung 1: Temperaturentwicklung im Festkörper unter Anwendung des 2-Temperaturmodells sowie nach klassischer Betrachtung [4]

Die Art der Ablation hängt zum großen Teil von der Pulsdauer des eingestrahlten Pulses und der entsprechenden im Material erreichten Temperatur ab. Die in Abhängigkeit der Aufheizung stattfindenden Phasenübergänge sind in Abbildung 2 dargestellt. Dabei ist τ_{crit} die Zeit, die benötigt wird um einen thermischen Gleichgewichtszustand zwischen

Schmelze und Dampf zu ermöglichen. Ist die Pulsdauer größer als τ_{crit} erfolgt das Erhitzen und das Verdampfen in einem thermischen Gleichgewichtszustand. Dieser Vorgang verläuft entlang der Binodale, da beide Phasen vorliegen, bis zum kritischen Punkt (CP) bei dem ein Übergang in die gasförmige Phase vollständig erreicht wird. Ist die Pulsdauer aber kleiner als τ_{crit} , so kommt es zu einem lokalen Überhitzen des geschmolzenen Materials, da der Schmelze schneller Energie zugeführt wird, als sie durch das Verdampfen verbraucht. Dies hat ein thermisches Ungleichgewicht der Schmelze gegenüber ihrer Dampfphase zur Folge. Die überhitzte Schmelze nähert sich der Spinodale, bei der ein Phasenübergang zwingend erfolgen muss, immer weiter an. Nach etwa 10^{-9} bis 10^{-8} s kommt es zu einem explosionsartigem Sieden der überhitzten Schmelze, was große Mengen an schmelzflüssigen Materials auswirft. Bei Femtosekunden-Laserpulsen führen zusätzlich auch, die infolge der sehr hohen Strahlungsintensität auftretenden mechanischen Spannungen, zum Abtragen von Material, welches bereits unterhalb der Schwellfluenz beginnt. Auch dieser Mechanismus wird nicht im 2-Temperaturmodell berücksichtigt, weshalb ergänzend eine Molekular-Dynamik-Simulation entwickelt wurde. Dieses Modell beschreibt die Ausbreitung von Druckwellen innerhalb der Probe auf atomarer Ebene, die infolge der schlagartigen Ausdehnung des bestrahlten Materials entstehen. Dieser Effekt kommt vor allem bei dünnen Schichten zum Tragen. Die Druckwellen breiten sich mit Schallgeschwindigkeit durch das Schichtmaterial aus und werden an der Grenzschicht zwischen Substrat und Metallschicht reflektiert. Dadurch entsteht eine erhöhte Energiekonzentration nahe der Grenzschicht, was zusätzlich, durch unterschiedliche thermische Ausdehnungen zu Spannungen in der Schicht führt. In neueren Modellen werden beide auch als hybride Simulation genutzt. In diesem folgt die Temperaturverteilung dem 2-Temperaturmodell und die Ausbreitung der Druckwellen der Molekular-Dynamik-Simulation. [1] [5] - [8]

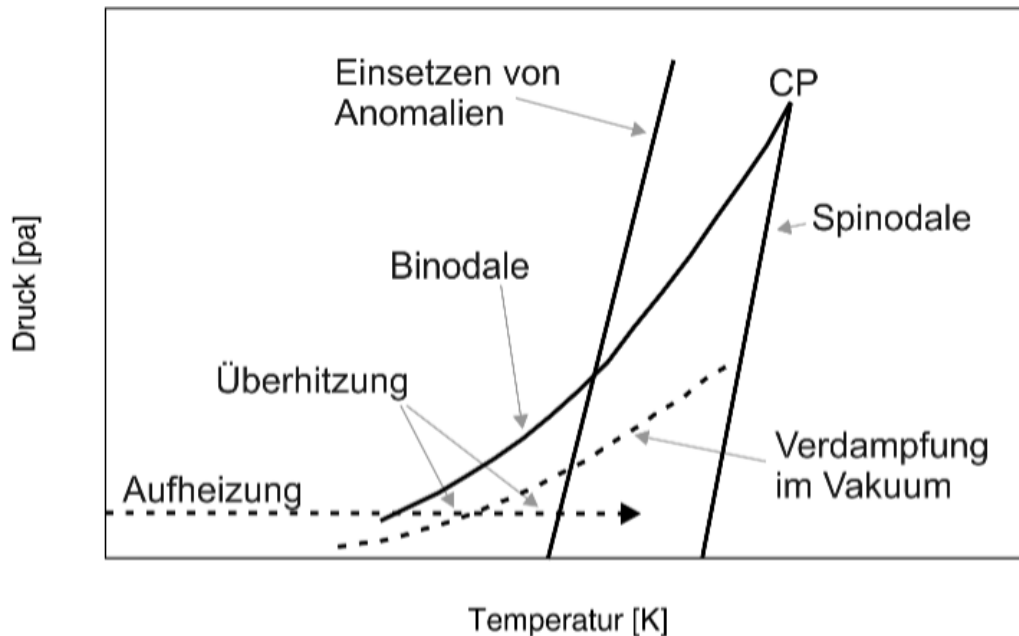


Abbildung 2: Phasendiagramm für Metalle, überhitzte Schmelze kann nur zwischen Binodale und Spinodale [6]

Zum Strukturieren von Oberflächen durch flächiges Abtragen mittels Laser ist ein Überlappen der Pulse erforderlich,. Bei Mehrfahrbestrahlung oder bei überlappender Bestrahlung kann auch ein Abtrag unterhalb der Schwellfluenz stattfinden, was auf Inkubationseffekte zurückzuführen ist. Inkubation beschreibt dabei Materialveränderungen, die als Folge der Bestrahlung vorherig eingestrahelter Laserpulse entstehen, so dass jeder folgende Puls auf ein Material mit veränderten Eigenschaften trifft. Als Ursache dafür können thermisch induzierte Spannungen, Veränderung der Oberflächengeometrie oder mikroskopische Effekte in Frage kommen. Ebenfalls kann es bei hohen Pulsfolgefrequenzen infolge der begrenzten Wärmeleitfähigkeit zur Akkumulation von Wärme kommen, die zu einer Erhöhung der Oberflächentemperatur führt. Die Oberflächentemperatur wiederum beeinflusst die optischen sowie thermischen Materialeigenschaften und damit maßgeblich das Ablationsverhalten. Ebenfalls befindet sich auf jedem Metall eine Oxidschicht, die sich hinsichtlich ihrer thermodynamischen und optischen Eigenschaften von der Metallschicht unterscheidet. Durch die Bestrahlung mit einem Laserpuls wird auch diese in ihren Eigenschaften verändert. Wird die Oxidschicht dagegen vollständig durch den Laserpuls abgetragen, so bildet sich aufgrund der parabolischen Abhängigkeit der Oxidationsgeschwindigkeit von der Oxidationsschichtdicke eine neue Oxidationsschicht an der Materialoberfläche. [1]

2.2 Verfahren zur Strukturierung dünner Schichten

Die Dünnschichttechnik ist eines der meist genutzten Verfahren zum Strukturieren von Schichten im Submikrometerbereich. Das Verfahren kann in fünf Arbeitsschritte unterteilt werden. Zuerst wird ein dünner Resistfilm mittels Resistschleuder auf die Funktionsschicht aufgebracht. Dieser wird anschließend durch eine Strukturvorlage (Maske) mit UV-Strahlung oder Teilchenbestrahlung strukturiert. Dadurch ändert sich die Löslichkeit des Resist an den bestrahlten Stellen. Je nach Änderung der Löslichkeit des Resist beim Bestrahlen unterscheidet man in:

Positivresist: belichtete Bereiche werden bei der Entwicklung gelöst.

Negativresist: unbelichtete Bereiche werden bei der Entwicklung gelöst

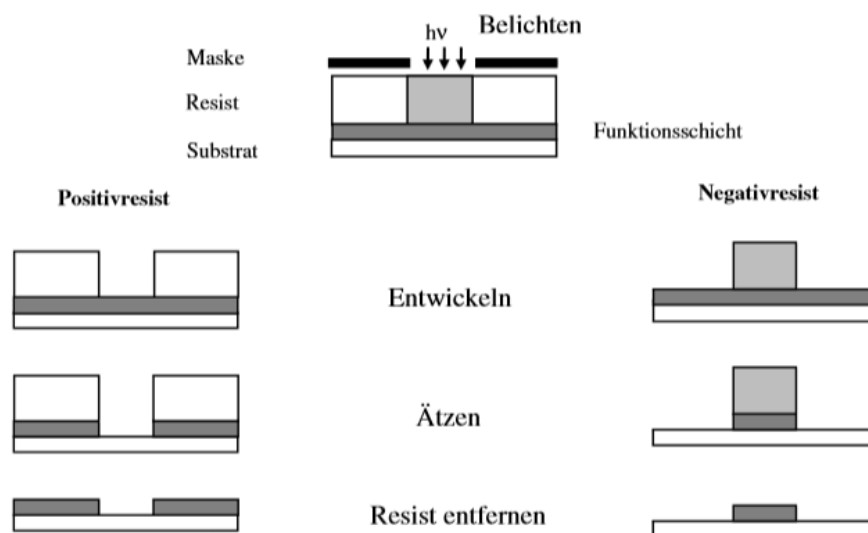


Abbildung 3: Prinzip der Photolithographie mit Positiv und Negativresist [8]

Beim nachfolgenden Entwickeln wird der belichtete (Positivresist) bzw. nicht belichtete (Negativresist) Resist entfernt. Dafür werden oft basische Entwickler verwendet, deren großer Nachteil ist, dass sie durch CO_2 aus der Luft teilweise neutralisiert und deshalb unbrauchbar werden. Der nicht entfernte Resist dient nun als Schutz beim anschließenden Strukturieren der Funktionsschicht. Zum Strukturieren der Schicht werden physikalische, z.B. Teilchenbestrahlung, aber auch chemische Verfahren, z.B. Ätzen genutzt. Es werden nur die nicht von einem Resist geschützten Stellen abgetragen, da das Resistmaterial gegenüber dem abtragenden Prozess resistent ist. Das Ätzen wird in Nass- und Trockenätzen unterteilt. Nassätzende Prozesse sind meist chemischer Art, trockenätzende Prozesse können dagegen chemisch, physikalisch oder in Kombination realisiert werden. Die beiden Prozesskategorien gliedern sich in isotrope und anisotrope Verfahren.

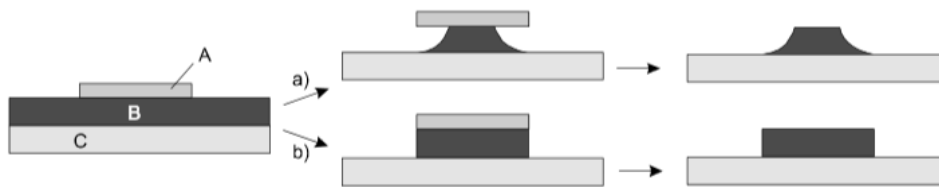


Abbildung 4: Strukturierung einer Schicht B zwischen dem Substrat C und einer Resistschicht A die a) Isotrop oder b) Anisotrop geätzt wurden [8]

Wie in Abbildung 4 a) zu sehen ist, tritt beim isotropen Ätzen eine starke Unterätzung des Resist auf. Beim anisotropen Ätzen in Abbildung 4 b) ist die Unterätzung des Resistfilms nicht oder in nur sehr geringem Maße zu finden, so dass dieses Verfahren vor allem zur Fertigung von Mikrostrukturen mit hohem Aspektverhältnis und steiler Flankengeometrie genutzt wird. Ein Vertreter des anisotropen Trockenätzens ist die Laserablation. Das Verfahren benötigt kein Vakuum wie das Elektronenstrahl- oder Ionenätzen. Durch die Entwicklung von Ultrakurzpuls-Lasern konnte dieses Verfahren weiter in seiner geometrischen Präzision gesteigert werden. Ebenfalls kann auf eine Lithographie verzichtet werden, was die Prozesszeiten deutlich verringert. Es wird deshalb immer mehr an der direkten Strukturierung von dünnen Schichten mittels Laser, als Alternative zur bisherigen Dünnschichttechnologie, geforscht. In Abbildung 5 ist dazu ein Bearbeitungsbeispiel, als Ergebnis bisheriger Forschungsaktivitäten, gezeigt. Die laserstrukturierte Platinschicht, mit einer Dicke von 130 nm befindet sich auf einer 15 nm dicken Titangrundschrift. Mittels einer Optik der Brennweite wurde ein Fokusedurchmesser von 10 μm erreicht. Die Größe des Scanfeldes wurde nicht angegeben. Der Abstand der Leiterbahnen, auch „Pitch“ genannt, im linken Bild der Abbildung 5, beträgt 50 μm .

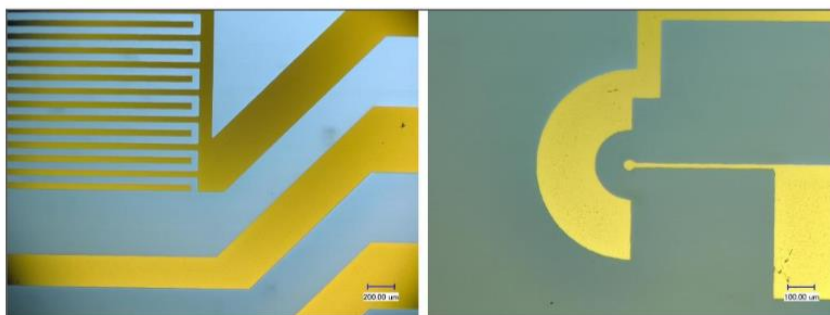


Abbildung 5: Links strukturierte Platinschicht rechts Ausschnitt eines Sensors [9]

3 Theoretische Vorbetrachtung

3.1 Einteilung in Wechselwirkungszonen

Je nach Fluenz, mit der ein Material bestrahlt wird, kommt es zu unterschiedlichen Reaktionen des Materials. Besonders bei gaußförmigen Intensitätsprofilen kann es aufgrund der sich nach außen verringernden Fluenz, zu verschiedenen Wechselwirkungszonen kommen, die sich hinsichtlich ihres charakteristischen Erscheinungsbildes unterscheiden.. Bei den, in dieser Arbeit untersuchten, Materialien konnten bis zu drei verschiedene Wechselwirkungszonen identifiziert werden. In der Abbildung 6 ist die Ausbildung der verschiedenen Wechselwirkungszonen nach Einstrahlung eines Einzelpulses am Beispiel einer dünnen Chromschicht gezeigt. Die Größe und Charakteristik der einzelnen Zonen hängen stark vom Intensitätsprofil der Laserstrahlung in der Bearbeitungsebene ab.

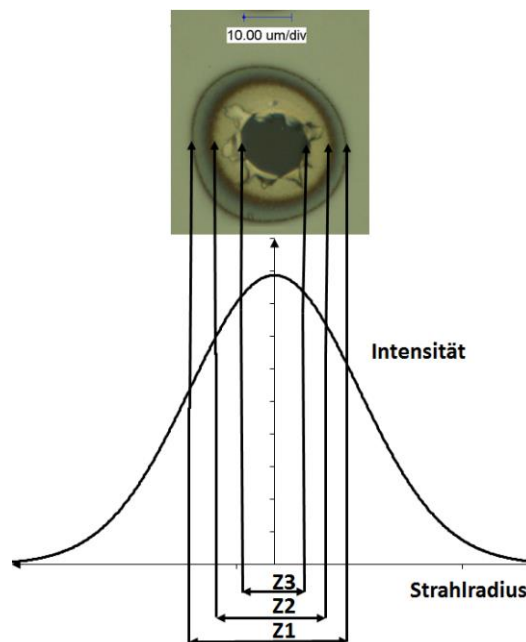


Abbildung 6: Einteilung der verschiedenen Wechselwirkungszonen am Beispiel Chrom

Die Wechselwirkungszone 1, im weiteren Verlauf der Arbeit mit Zone 1 beschrieben, ist dadurch gekennzeichnet, dass in diesem Bereich das Material bereits modifiziert aber nicht abgetragen wurde. Die in Abbildung 6 gezeigte Wechselwirkungszone 2, im Folgenden mit Zone 2 benannt, definiert einen Bereich in dem ein Abtrag des Schichtmaterials stattgefunden hat, der Abtrag aber nicht bis auf das Substrat erfolgte. Die Wechselwir-

kungszone 3, nachfolgend mit Zone 3 bezeichnet, beschreibt die Zone, in der das Schichtmaterial komplett vom Substrat entfernt worden ist. In der Abbildung 6 ist die Verteilung der Zonen über ein Einzelpulsereignis am Beispiel einer dünnen Chromschicht gezeigt. Die Form der einzelnen Zonen hängt vom Intensitätsprofil im Fokus ab. Mittels der Formel (4) und der jeweiligen Schwellfluenz lassen sich die Durchmesser einer Zone die ein Puls erzeugen würde berechnen.

$$D = \sqrt{2 * w_{86}^2 * \ln\left(\frac{H}{H_{th}}\right)} \quad (4)$$

3.2 Bearbeitungsregime

In Abbildung 7 ist die Intensitätsverteilung eines theoretisch berechnete räumliche Energieverteilung Gauß-Strahles über den Strahlquerschnitt für zwei unterschiedliche Strahlleistungen gezeigt. Ebenfalls sind beispielhafte Schwellfluenzen eingetragen die von den Intensitätsverteilung mit einer unterschiedlichen radialen Ausdehnung überschritten werden. Dieses Verhalten kann beim Strukturieren dünner Schichten in einem gewissen Rahmen vorteilhaft ausgenutzt werden. Sollen möglichst kleine Strukturen gefertigt werden so bietet es sich an eine Fluenz bei der das Fluenzmaximum möglichst knapp über der Schwellfluenz H_{th_Z3} des Schichtmaterials wie beispielhaft H_2 in der Abbildung 7 zu wählen, da so der feinstmögliche Abtrag realisiert werden kann. Aufgrund der theoretischen vorteilhaften Bedeutung dieses Parameterbereichs knapp über der Schwellfluenz H_{th_Z3} werden Laserparameter, bei denen der kleinstmögliche aber dennoch rückstands-freien Abtrag möglich ist, im Laufe der Arbeit als Feinbearbeitungsparameter bezeichnet. Steigert man die Fluenz, wie in der Abbildung 7 beispielhaft gezeigt, von H_2 auf H_1 führt dies dazu, daß die Spurbreite der Zone 3 von D_{2_Z3} auf D_{1_Z3} anwächst. Überschreitet man dabei die Schwellfluenz $H_{th_zerstör.}$, kommt es zu einer Beschädigung des Substrats. Für einen möglichst schnellen flächigen Abtrag ist es von daher vorteilhaft, eine Fluenz zu wählen, bei der sich das Fluenzmaximum knapp unter der Schwellfluenz $H_{th_zerstör.}$ befindet. Laserparameter bei denen die größte Spurbreite erzielt werden, kann, ohne das Substrat zu beschädigen, werden im Laufe der Arbeit als Schruppbearbeitungsparameter bezeichnet.

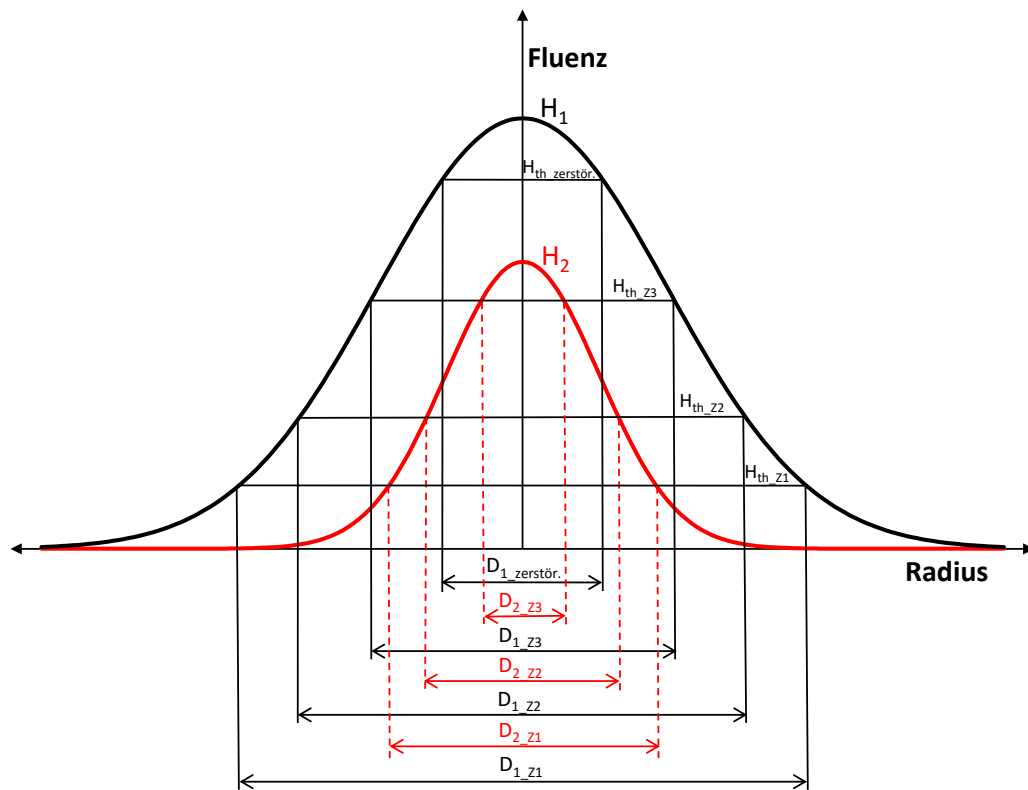


Abbildung 7: Änderung der Spurbreiten aufgrund verschiedener Fluenzen

4 Experimentelle Details

4.1 Technischer Aufbau

4.1.1 Lasergerätetechnik

Zur Untersuchung der dünnen Schichten wurde ein hochrepetierender Ultrakurzpulslaser verwendet. Das laseraktive Medium ist ein diodengepumpter, Yb-dotierter Faserlaser, der ultrakurze Pulse durch Modenkopplung, bei einer Zentralwellenlänge von $1,03\text{ }\mu\text{m}$, erzeugt. Die Pulse werden anschließend mittels Chirped Pulse Amplification verstärkt und die Pulsdauer auf 200 fs eingestellt. Das Lasergerät wurde bei einer Frequenz von $1,024\text{ MHz}$ betrieben wobei die genutzte Pulswiederholfrequenz mittels eines akusto optischen Modulators variiert werden kann. Die maximale mittlere Leistung beträgt 7 W wodurch Pulsennergien bis zu $6,8\text{ }\mu\text{J}$ genutzt werden können. Das Lasergerät erzeugt Pulse mit einem TEM₀₀ und einer Beugungsmaßzahl M^2 von $1,42$.

Tabelle 1: Übersicht der Laserparameter

Wellenlänge λ [nm]	Frequenz f [kHz]	Pulsdauer τ [fs]	Max. Mittlere Leistung P_{av} [W]	Beugungs- maßzahl M^2
1030	32-1024	200	7,1	1,42

4.1.2 Scanner und Optik

Die vom Lasergerät emittierte Strahlung wird mittels dielektrischer Spiegel zum Scanner geführt. Dabei gehen $2,39\text{ }\%$ der abgegebenen Strahlungsleistung des Lasergerätes bis zum Bearbeitungsort verloren. Die maximale Scangeschwindigkeit betrug 4 m/s . Die verwendete F-Theta Optik besaß eine Brennweite von 56 mm , womit ein räumlicher Fokusradius von $16,4\text{ }\mu\text{m}$ erreicht wurde. Die Rayleighlänge gibt die Entfernung an bei der sich die Querschnittsfläche der Strahltaile gegen über der im Fokus verdoppelt und beträgt $407\text{ }\mu\text{m}$. Das Strahlprofil wurde mit einem Micro,Spot,Monitor der Firma Primes vermessen. Das gemessene Strahlprofil entspricht einem Gaußprofil und ist in Abbildung 8 zusehen. [10]

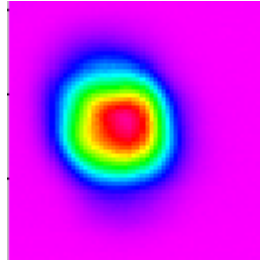


Abbildung 8: Strahlprofil

4.2 Materialien

Die in dieser Arbeit untersuchten Materialien bestanden aus einem Glassubstrat und einer dünnen aufgesputterten Metallschicht. Es wurden vier Metallschichten, Chrom, Aluminium, Kupfer und Titan untersucht, die sich in ihren thermophysikalischen Eigenschaften unterscheiden. Auch die Dicke der Schichten variierte zwischen 0,02 µm und 0,5 µm. Die Schichtdicken wurden mit einem Konfokalmikroskop bestimmt.

Tabelle 2: Dicke der Metallschichten

Metall	Chrom	Aluminium	Kupfer	Titan
Schichtdicke [µm]	0,16	0,23	0,5	0,02

4.2.1 Optische Eigenschaften

In diesem Kapitel wird auf die optischen Eigenschaften der Schichtmaterialien eingegangen. Sie bestimmen, den absorbierten Anteil der eingestrahlten Energie und wie tief die Strahlung in das Schichtmaterial eindringt. Ist die optische Eindringtiefe größer als die Schichtdicke des Metalls, so kommt es zum Durchstrahlen der Schicht. Es kann dann nicht mehr nur von Absorption und Reflexion der Strahlung ausgegangen werden, sondern es tritt zusätzlich Transmission auf. Die optische Eindringtiefe d_E kann mittels des Extinktionskoeffizient K nach Formel [3] berechnet werden. Der Extinktionskoeffizient ist ein auf Wellenlängen bezogenes Maß und gibt an, wie stark ein Laserpuls durch Streuung und Absorption abgeschwächt wird, wenn er ein Medium durchdringt. [10]

$$d_E = \frac{1}{K} \quad (5)$$

Tabelle 3: relevante optische Eigenschaften der Metallschichten [11]

Metall	Chrom	Aluminium	Kupfer	Titan
--------	-------	-----------	--------	-------

Reflexionsgrad	62,9	95,21	97,6	55
optische Eindringtiefe [nm]	19	8	9	24

Die in der Tabelle 3 aufgeführten Werte gelten für eine Wellenlänge von 1030 nm. Wie in Abbildung 9 dargestellt, verringert sich der Reflexionsgrad aber auch schon während der Bestrahlung mit ultrakurzen Pulsen. Ebenfalls ist, etwas verzögert, ein Abfall des Absorptionskoeffizienten zu sehen.. Durch die Berücksichtigung eines dynamischen Reflexionsgrad und Absorptionskoeffizienten im 2-Temperaturmodell konnte in Simulationen gezeigt werden, dass die Temperaturen der Elektronen und des Gitters zwei bis dreimal so hoch werden als bei statischen Werten

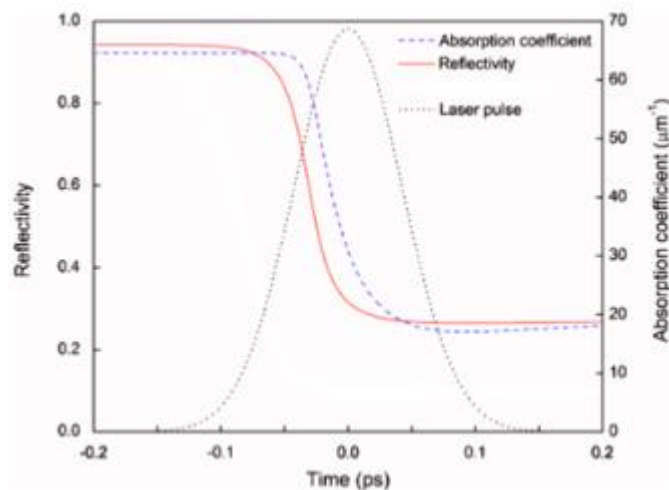


Abbildung 9: Änderung des Reflexionsgrades und des Absorptionskoeffizienten unter Einwirkung eines 100 fs Pulses [12]

Ebenfalls kann es durch die hohen Intensitäten zu nichtlinearen Effekten, wie z.B. Mehrphotonen-Absorption, kommen, was dazu führen kann, dass von einem Elektron mehr als nur 1 Photon absorbiert wird. [1] [12] [13]

4.2.2 Thermo-Physikalische Eigenschaften

Die thermischen Eigenschaften sind wie die optischen Eigenschaften von großer Bedeutung bei der Ablation mittels Laser. Sie bestimmen wieviel Energie zugeführt werden muss, um einen Phasenwechsel zu bewirken. Wie die optischen Eigenschaften sind auch sie von der Temperatur abhängig. Da allerdings mit ultrakurzen-Pulsen experimentiert wird und die Schichten sehr dünn sind ist die Wärmeleitfähigkeit in die tiefe stark einge-

schränkt, weshalb sich die Wärme nur lateral in der Schicht ausbreiten kann. Es treten geringe Verluste durch Konvektion und Wärmestrahlung auf. Aber auch ausgeworfene noch heiße Schmelze die ihre Wärme nichtmehr in die Schicht abgeben kann entzieht der Schicht einst zugeführte Wärmeenergie. In der Tabelle 4 sind die mittlere Spezifische Wärmekapazität angegeben. [14]

Tabelle 4: relevante thermische Eigenschaften der Metallschichten

Metall	Chrom	Aluminium	Kupfer	Titan
Schmelztemperatur [°C]	1907	660	1084	1668
Siedetemperatur [°C]	2482	2470	2567	3287
Wärmeleitfähigkeit [W/m*K]	94	235	400	22
Spez. Wärmekapazität [J/kg*K]	449	897	385	520

4.2.3 Ablationsschwellen

Wie in 3.1 gezeigt, kommt es durch die gaußförmige Intensitätsverteilung des Laserstrahles zu unterschiedlichen Bearbeitungsergebnissen innerhalb eines bestrahlten Bereichs, die entsprechend ihres Erscheinungsbildes in unterschiedliche Zonen eingeteilt wurden. Diese Zonen entstehen, wenn eine spezifische Fluenz, die Schwellfluenz genannt wird, überschritten wird. Die in der Tabelle 5 für die unterschiedlichen Zonen angegebenen Schwellfluenzen wurden in einer vorangegangenen Arbeit ermittelt. Die angegebenen Schwellfluenzen sind abhängig vom Schichtmaterial, von der Schichtdicke, der Pulsdauer und der verwendeten Optik und wurden bei einem Pulsabstand von 100 µm, einer Puls-wiederholrate von 32 kHz und einer Pulsdauer von 200 fs ermittelt. Sie wurden nach der Methode von LUI ermittelt und gelten für Einzelpulsereignisse.

Tabelle 5: Ablationsschwellen für Einzelpulse der Zonen 1 bis 3 der untersuchten Schichtmaterialien

Metall	Chrom	Aluminium	Kupfer	Titan
--------	-------	-----------	--------	-------

H_{th_z1} [J/cm²]	0,14	/	/	/
H_{th_z2} [J/cm²]	0,32	0,52	0,1	0,08
H_{th_z3} [J/cm²]	/	0,74	/	0,15

4.3 Analyseverfahren

Wie im Kapitel 3.1 erklärt treten bei der Bearbeitung mittels Laserpulsen unterschiedliche Wechselwirkungszonen auf die in Zonen eingeteilt werden können. Beim überlappenden Bearbeiten der Schichten kommt es oft nur zu einem lokalen Erreichen der Zoneeigenschaften, wie Beispielhaft in Abbildung 10 gezeigt. Daraus ist erkennbar, dass für den Einzelpuls die jeweilige Zone erreicht worden ist, aber in ihrer Gesamtheit nicht als Linienabtrag entsprechend der Zone 3 gewertet werden kann. Die entsprechende Zone muss über die gesamte Länge der Linie, wie in Abbildung 11 (rote Linie) gezeigt, vorhanden sein, um als Linienabtrag einer Zone gewertet zu werden. Für den Linienabtrag der Zone 3 gilt zusätzlich, dass innerhalb keine Schmelzreste mehr vorhanden sein dürfen. Ähnliches gilt nun auch für den linienhaften Abtrag der Zone 2. Wird die Voraussetzung nicht erfüllt, dass sich die einzelnen Zonen 2 nicht berühren, wie in Abbildung 12, so kann auch hier nicht von einem linienhaften Abtrag, wie er in Abbildung 13 gezeigt, ausgegangen werden. Ebenfalls wird in der Abbildung gezeigt dass, wenn die erweiterten Kriterien erfüllt sind, die größte Ausdehnung des linienhaften Abtrags der Zone 2 gemessen wurde (rote Linie) und nicht nur der sich überlappende Bereich. Gleiches gilt für die linienhaften Bearbeitung der Zone 1 (blaue Linie). Die Spurbreiten des linienhaften Abtrags der Zonen wurden mit einem Lichtmikroskop der Firma Keyence bei einer 2000-fachen Vergrößerung gemessen.

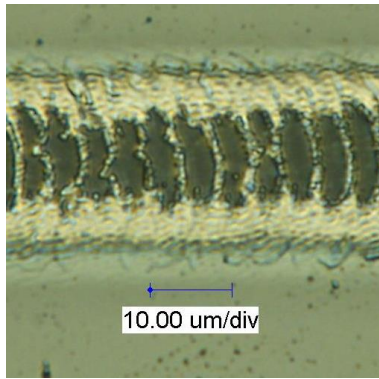


Abbildung 10: Beispiel für Linienabtrag, der nicht Kriterien für Zone 3 erfüllt

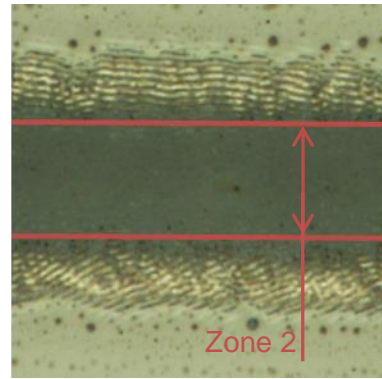


Abbildung 11: Beispiel für Linienabtrag, der die Kriterien für Zone 3 erfüllt

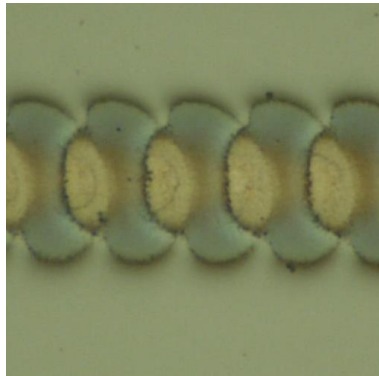


Abbildung 12: Beispiel für Linienabtrag der nicht Kriterien für Zone 2 erfüllt

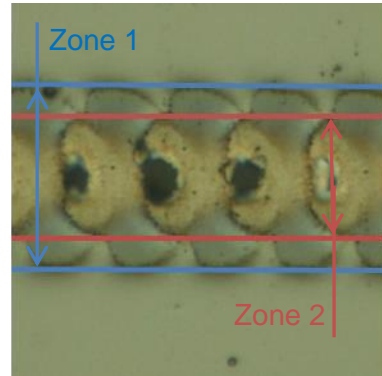


Abbildung 13: Beispiel für Linienabtrag, der die Kriterien für Zone 1 (blau) sowie Zone 2 (rot) erfüllt

5 Ergebnisse

5.1 Chrom

5.1.1 Variation des Pulsabstandes

Um den Einfluss durch Variation des Pulsabstandes zu untersuchen wurden zuerst die möglichen Spurbreiten in Abhängigkeit der Fluenz abgeschätzt und sind in der Abbildung 14 für die jeweiligen Zonen gezeigt. In der Abbildung 14 ist zu sehen, dass sich die Spurbreite der Zone 1 von 24,6 μm auf 32,5 μm und die der Zone 2 von 12,6 μm auf 29,4 μm vergrößert wenn man die Fluenz von 0,43 J/cm^2 auf 1,6 J/cm^2 steigert. Um die Spurbreite abzuschätzen wurden die Formel (4) und die Schwellfluenz für Einzelpulsereignisse von Chrom verwendet was bedeutet, dass es zu keinem Einfluss durch Inkubations und Akkumulationseffekten auf die Spurbreite kommt.

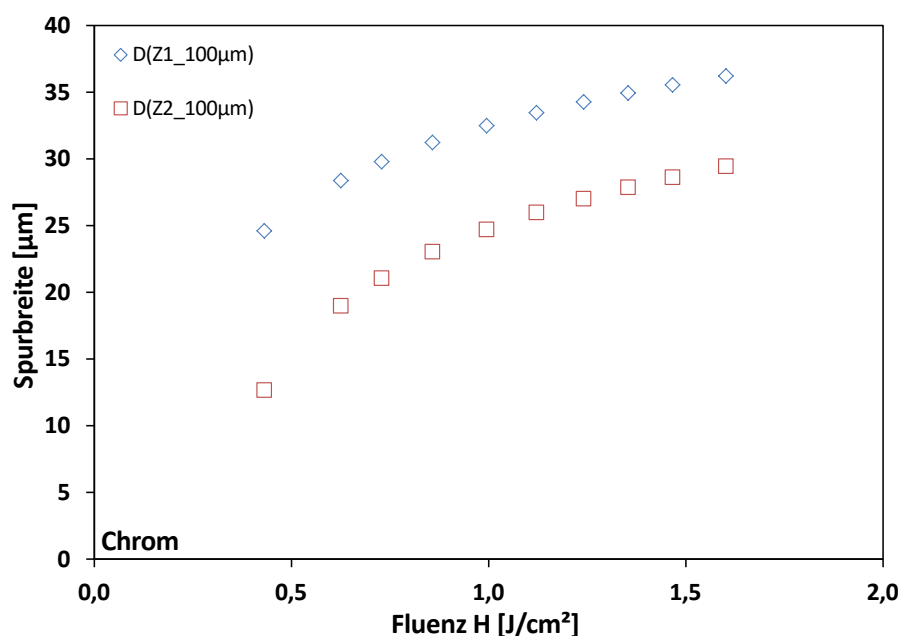
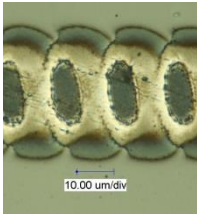
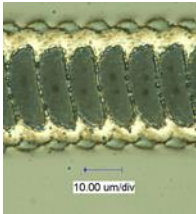
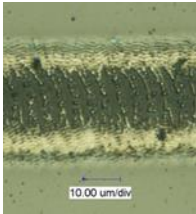
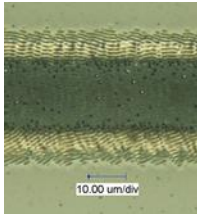
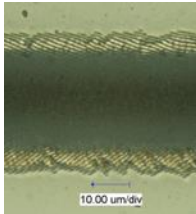
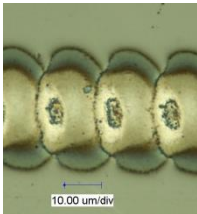
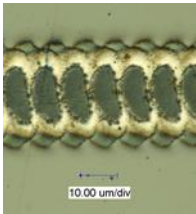
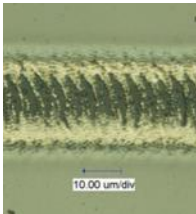
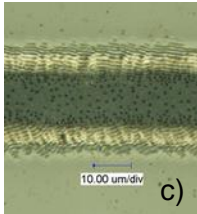
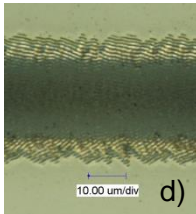
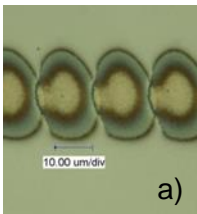
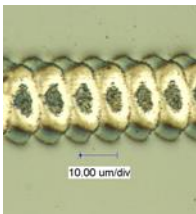
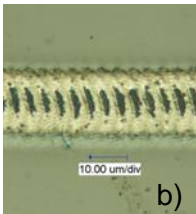
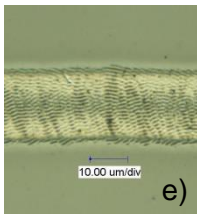
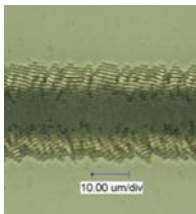


Abbildung 14: Abschätzung der möglichen Spurbreiten in Abhängigkeit von der Fluenz mittels der Formel (4) und den Schwellfluenzen für Einzelpulse von Chrom

Die Untersuchung ob es zu einem des Einflusses des Pulsabstands auf den Linienabtrag kommt wurden bei einer Pulswiederholfrequenz von 32 kHz und einem Linienabstand von 200 μm durchgeführt. In der Tabelle 6 ist eine Übersicht in der die Bearbeitungsergebnisse von verschiedenen Pulsabständen bei verschiedenen Fluenzen zu sehen. Der Pulsabstand wurde im Bereich von 1 μm bis 15 μm , die Fluenz von 0,3 J/cm^2 bis 0,9 J/cm^2 vari-

iert. Bei dem Schichtmaterial Chrom können drei Zonen als Linienabtrag ausgemacht werden. Diese treten aber nicht bei allen Pulsabständen auf.

Tabelle 6: Übersicht der Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Pulsabständen in Abhängigkeit der Fluenz bei einer Pulswiederholfrequenz von 32 kHz und einem Linienabstand von 200 μm

15 μm	8 μm	4 μm	2 μm	1 μm	
					0,9 J/cm ²
					0,6 J/cm ²
					0,3 J/cm ²

In der Tabelle 6 ist zu sehen, dass es bei geringen Fluenzen oder bei großen Pulsabständen die Schicht nicht vollständig abgetragen wurde. aber es bei hohen Fluenzen und oder einem geringen Pulsabstand zu einem vollständigen Abtrag der Schicht kommt. Es ist zu sehen das es innerhalb des sich überlappenden Bereichs zu einem verstärktem Abtrag gekommen ist wie z.B. im Bild a) der Tabelle 6 zu sehen. Dies kann auf die vorgeschädigte Schichtoberfläche durch den Vorgänger Puls und den daraus folgenden Inkubationseffekt, wie schon in 2.1 beschrieben, für den nachfolgenden Puls zurückgeführt werden. Ebenfalls ist zu sehen, dass es durch das steigern der Fluenz oder durch verringern des Pulsabstandes es anfänglich nur zu einem lokalem Erreichen der Zone 3 kommt. Zwischen den lokalen Bereichen der Zone 3 bilden Reste der Zone 2 Stege quer zur Bearbeitungsrichtung aus, wie im Bild b) der Tabelle 6 zu sehen. Die Abstände der Stege zueinander sind so groß wie der genutzte Pulsabstand, die Breite der Stege hängt von der genutzten Fluenz ab. Die Stege bilden sich ab einem Pulsabstand von 3 μm wie im Bild e)

der Tabelle 6 zu sehen nicht mehr aus. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass flüssige Schmelze erzeugt durch ein nachfolgenden Puls den vorher lokal bis zum Substrat abgetragenen Bereich wieder füllen. Es beginnen sich auch ab einem Pulsabstand von 4 μm Rippel innerhalb der Zone 2 auszubilden. Steigert man die Fluenz oder verringert man den Pulsabstand weiter zerfallen diese Stege zu Schmelzkugeln welche auf dem Substrat vereinzelt zurück bleiben, wie z.B. im Bild c) in der Tabelle 6 gezeigt. Durch weiteres Erhöhen der Fluenz bzw. Verringern der Fluenz kommt es zunächst zu einem sauberen Linienabtrag entsprechend der Zone 3 wie im Bild d) der Tabelle 6 zu sehen, bis es zu einer Verfärbung des Substrats kommt wie bei gleichem Pulsabstand bei einer Fluenz von 0,9 J/cm^2 zu sehen ist. In der Abbildung 15 sind die gemessenen Spurbreiten der Zone 1 in Abhängigkeit der Fluenz für verschiedene Pulsabstände gezeigt.

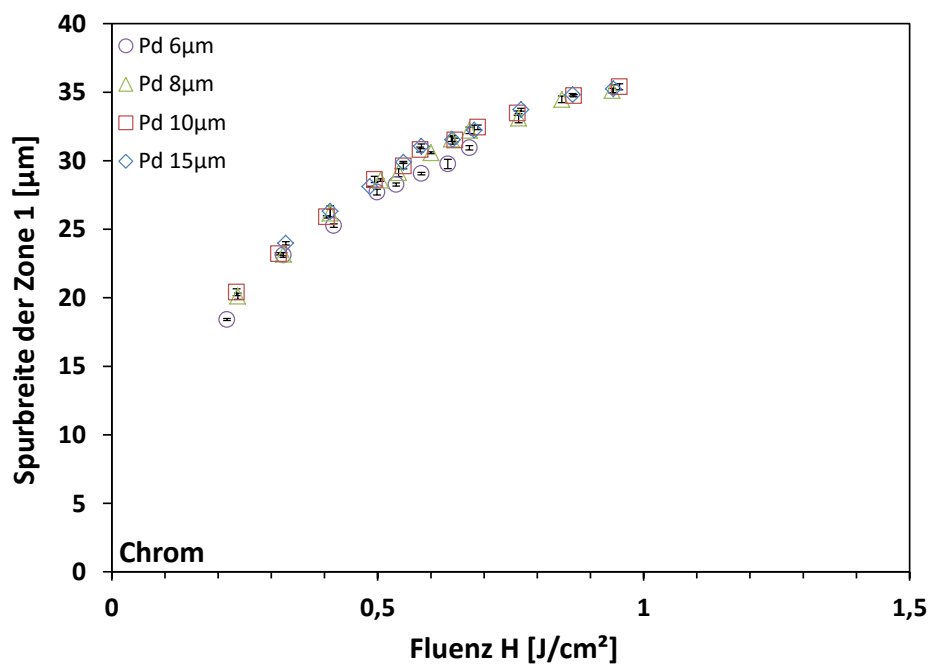


Abbildung 15: Spurbreite der Zone 1 in Abhängigkeit der Fluenz bei verschiedenen Pulsabständen, Frequenz 32 kHz, Linienabstand 200 μm , Pulsdauer 200 fs

Aus der Abbildung 15 ist zu erkennen, dass die Breite der Zone 1 bei den verschiedenen Pulsabständen nahezu gleich bleibt. Aufgrund eines zu großen Pulsüberlapp kommt es ab einem Pulsabstand von 5 μm , dass die Zone 1 nichtmehr sichtbar vorhanden ist. Ab einem Pulsabstand von 15 μm und einer Fluenz von 0,22 J/cm^2 ist kein Linienabtrag der Zone 1 mehr festzustellen. Berechnet man nach LIU die Schwellfluenz der Zone 1 sowie den Fokusradius für z.B. einen Pulsabstand von 8 μm erhält man eine Schwellfluenz von 0,13 J/cm^2 und einen Fokusradius von 17,7 μm . Dies stimmt gut mit den für Einzelpulse ermittelten Werten überein. Der zugehörige LUI-Plot befindet sich im Anhang Teil 1. Durch das Vergleichen der gemessenen Spurbreiten mit den theoretisch abgeschätzten Spurbreiten der Zone 1, zeigt sich dass bei einer Fluenz von 0,4 J/cm^2 die gemessene Spurbreite

um $1,7\text{ }\mu\text{m}$ größer und bei einer Fluenz von $0,95\text{ J/cm}^2$ um $2,7\text{ }\mu\text{m}$ ebenfalls größer ist als die geschätzten Spurbreiten. Dies zeigt, dass ein Einfluss des Pulsabstands auf die Spurbreite der Zone 1 vorhanden ist, er jedoch relativ gering ist da die Spurbreite bei den untersuchten Pulsabständen nahezu gleich bleibt. Anders Verhält es sich beim Linienabtrag unter Ausnutzung der Zone 2. Wie in Abbildung 16 zu sehen, in der die gemessenen Spurbreiten der Zone 2 in Abhängigkeit der Fluenz für verschiedene Pulsabstände dargestellt ist, vergrößert sich die Spurbreite der Zone 2 stark im Gegensatz zur Zone 1 je kleiner der Pulsabstand wird.

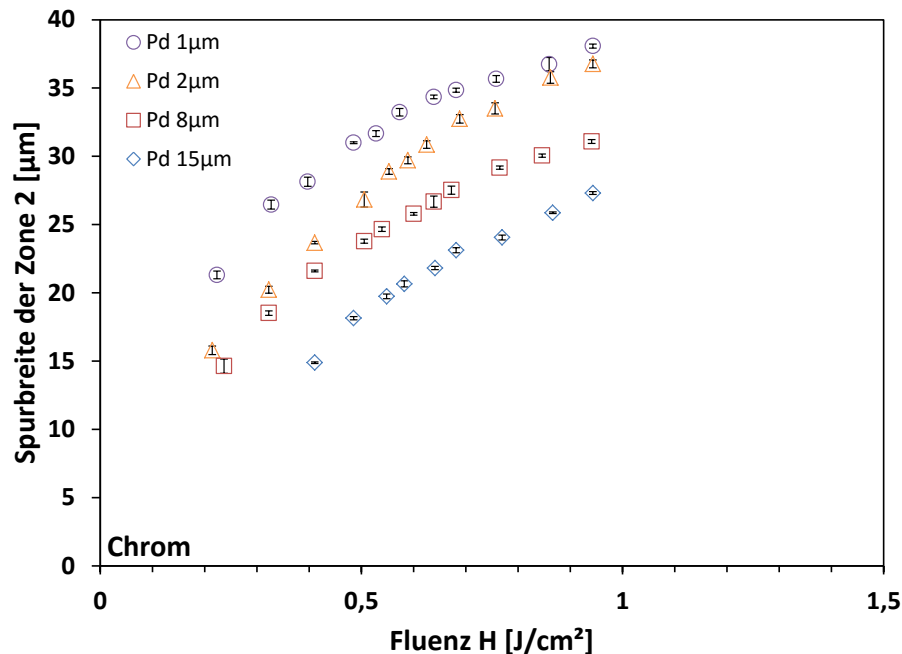


Abbildung 16: Spurbreite der Zone 2 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Pulsabständen, Frequenz 32 kHz, Linienabstand $200\text{ }\mu\text{m}$, Pulsdauer 200 fs

Das Verbreitern der Spurbreite kann auf die erhöhten Energieeintrag, den größer werden den vorgeschädigten Bereich was zu Inkubationseffekten führt und einer erhöhten Schichttemperatur durch Wärmeleitung was zu Akkumulationseffekte führt, bei kleineren werdenden Pulsabständen zurückgeführt werden. Die Schwellfluenz der Zone 2 für Einzelpulse betrug $0,32\text{ J/cm}^2$. Um bei gleicher Fluenz einen linienhaften Abtrag der Zone 2 zu erzeugen ist ein Pulsabstand von $10\text{ }\mu\text{m}$ notwendig. Erst ab da kommt es dazu, dass sich die durch den Einzelpuls und die durch das Überlappen erzeugten Bereiche der Zone 2 berühren. Um dies bei größeren Pulsabständen zu erreichen, ist wie in Abbildung 16 zu sehen, eine höhere Fluenz notwendig. Für einen Pulsabstand von $15\text{ }\mu\text{m}$ waren $0,41\text{ J/cm}^2$ notwendig um ein linienhaften Abtrag der Zone 2 zu realisieren. Also deutlich über der Schwelle für Einzelpulse. Vergleicht man die gemessenen mit den geschätzten Spurbreiten zeigt sich das die Spurbreite bei einem Pulsabstand von $15\text{ }\mu\text{m}$ bei den Fluenz $0,4\text{ J/cm}^2$ und $0,9\text{ J/cm}^2$ ist die gemessene Spurbreite $2,2\text{ }\mu\text{m}$ bzw. $2,6\text{ }\mu\text{m}$ größer als die

geschätzte. Derselbe Vergleich mit $1\text{ }\mu\text{m}$ zeigt das die gemessenen Spurbreiten bei $0,4\text{ J/cm}^2$ um $11,5\text{ }\mu\text{m}$ größer sind als die Geschätzten und bei $0,9\text{ J/cm}^2$ sogar $13,4\text{ }\mu\text{m}$.

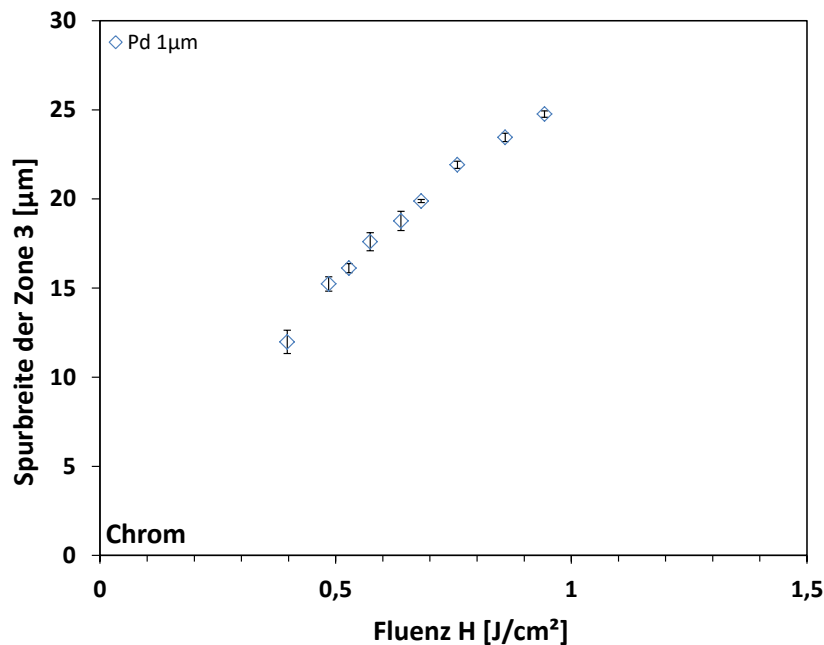


Abbildung 17: Spurbreite der Zone 3 in Abhängigkeit der Fluenzen, Frequenz 32 kHz, Linienabstand 200 μm , Pulsdauer 200 fs

Wie in Abbildung 17, in der die Spurbreite des Linienabtrags der Zone 3 in Abhängigkeit von der Fluenz bei einer Pulswiederholffrequenz von 32 kHz und einer Pulsdauer von 200 fs dargestellt ist, zu sehen ist konnte ein Linienabtrag der Zone 3 nur mit einem Pulsabstand von $1\text{ }\mu\text{m}$ erzielt werden. Durch das Erhöhen der Fluenz bilden sich nun statt Stegen kleine Schmelzkugeln auf dem Substrat aus. Sie entstehen zuerst im Zentrum des linienhaften Abtrags und breiten sich mit steigender Fluenz nach außen aus. Dies geschieht hauptsächlich bei den Pulsabständen von $3\text{ }\mu\text{m}$ bis $2\text{ }\mu\text{m}$. Bei Fluenzen unter $0,32\text{ J/cm}^2$ und einem Pulsabstand von $1\text{ }\mu\text{m}$ bleiben keine Schmelzkugeln zurück sondern, wie in Abbildung 18 zu sehen, sehr dünne Reste der Riffel innerhalb der Spur. Diese sind Reste der Zone 2 die stark mit Riffeln versehen ist, wie in Abbildung 18 zu sehen. Bei höheren Fluenzen findet mittig in der Spur beginnend ein sauberer Abtrag des Schichtmaterials statt. Ab einer Schwellfluenz von $0,4\text{ J/cm}^2$ kam es zu einem Linienabtrag der Zone 3. Aus der Abbildung 17 kann entnommen werden, dass die Spurbreiten der Zone 3 bei den genutzten Fluenzen von $12,0\text{ }\mu\text{m}$ bis $24,8\text{ }\mu\text{m}$ reichen. Subtrahiert man die Spurbreite der Zone 3 von der Spurbreite der Zone 2, bei gleichem Pulsabstand, so zeigt sich das bei steigender Fluenz die Differenz immer kleiner wird. Allerdings kann nicht davon ausgegangen werden das die Zone 3 die Zone 2 komplett überlagert wie die Zone 2 die Zone 1. Gründe dafür sind die Gaußähnliche Strahlverteilung und das Beschädigen des

Substrats ab einer Fluenz von ca. $0,7 \text{ J/cm}^2$. Ein Aufwurf des Randbereiches der Schicht über $1 \mu\text{m}$ konnte nicht festgestellt werden. [15]

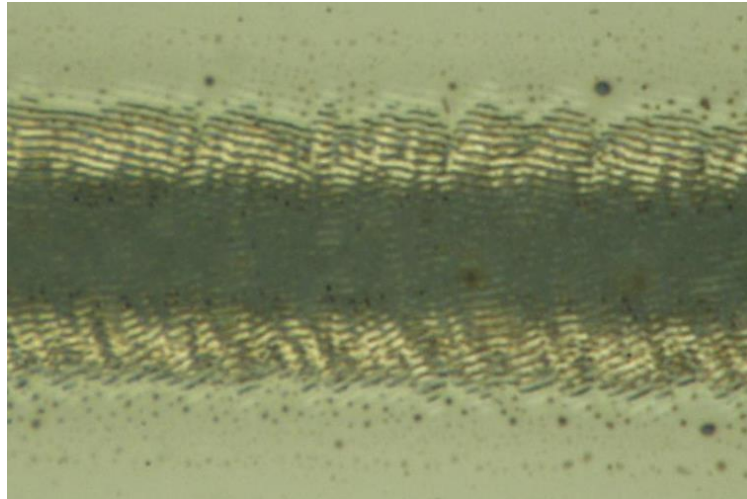


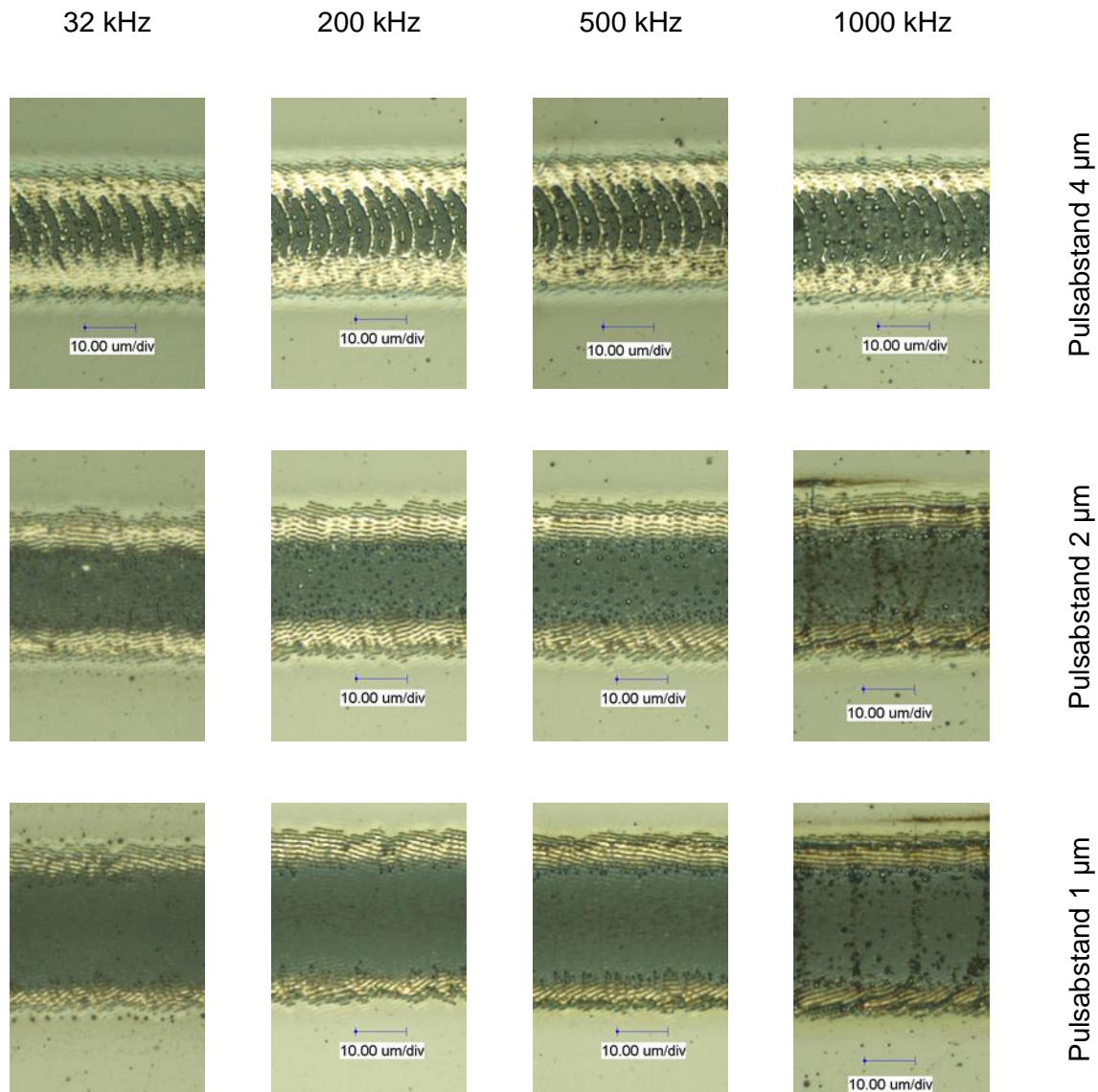
Abbildung 18: Riffelrückstände in der Spur statt Schmelzkugeln, Pulsabstand $1 \mu\text{m}$, Frequenz 32 kHz , Pulsdauer 200 fs Fluenz $0,32 \text{ J/cm}^2$

Berechnet man die Schwellfluenz für den linienhaften Abtrag der Zone 3 sowie den Fokusradius, erhält man $0,32 \text{ J/cm}^2$ und $16,6 \mu\text{m}$ als Ergebnis. Der berechnete Fokusradius entspricht dem gemessenen. Ebenfalls ist schon in Abbildung 18 gezeigt worden, dass bei dieser berechneten Schwellfluenz sich noch Rückstände des Schichtmaterials innerhalb der Zone 3 befinden. Der zugehörige LIU-Plot befindet sich im Anhang Teil 1.

5.1.2 Variation der Frequenz

Um den Einfluss der Pulswiederholfrequenz auf den Schichtabtrag zu untersuchen wurde die Frequenz im Bereich zwischen 32 kHz auf 1 MHz erhöht. In der folgenden Übersicht sind die Bearbeitungsergebnisse bei einer Fluenz von $0,6 \text{ J/cm}^2$ bzw. $2,8 \mu\text{J}$ Pulsenergie aufgeführt. Die Pulsenergie wurde konstant gelassen, um jeweilig mit der gleichen Streckenenergie die Schicht zu bearbeiten. Durch das Steigern der Frequenz wurde so lediglich die Zeit in der der Energieeintrag erbracht wird verringert. Dies kann bei geringen Pulsabständen dazu führen, dass der nachfolgende Puls noch auf eine infolge des vorher eingestrahnten Laserpulses erwärmte Chromschicht trifft. Wie schon im Kapitel 4.2.1 bei den optischen Eigenschaften beschrieben sind diese temperaturabhängig.

Tabelle 7: Übersicht der Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Frequenzen in Abhängigkeit des Pulsabstandes bei einer Fluenz von $0,64 \text{ J/cm}^2$, einer Pulsdauer von 200 fs und einem Linienabstand von $200 \mu\text{m}$



In der Übersicht ist zu erkennen, dass es zu einer vermehrten Bildung von Schmelzkugeln am inneren Rand der Zone 2 bei Frequenzen höheren als 500 kHz kommt. Bei einem Pulsabstand von $2 \mu\text{m}$ und ab einer Frequenz von 1 MHz treten deutlich sichtbare Risse im Substrat auf. Die Rissbildung ist auch schon bei 500 kHz und einem Pulsabstand von $1 \mu\text{m}$ zu sehen, fällt allerdings geringfügiger aus. Als Ursache dafür ist eine höhere thermische Belastung des Substrats infolge des höheren Energieeintrages durch höhere Frequenzen bzw. geringeren Pulsabstand zu sehen. Die steigende Belastung des Substrats durch die schneller Einwirkung der Laserstrahlung ist auch am beginnenden verfärben des Substrats ab einer Frequenz von 200 kHz bei einem Pulsabstand von $1 \mu\text{m}$ zu erkennen. Ebenfalls kann der Übersicht entnommen werden, dass die Stege quer zur Bearbeitungsrichtung schmaler bei steigender Frequenz werden bis sie schließlich zu einzelnen

Schmelztropfen zerfallen. Erhöht man die Fluenz weiter bei der Frequenz von 500 kHz so bilden sich auch hier die schon angesprochen Risse im Substrat aus, sowie eine Verfärbung des Substrat einsetzt. In der Abbildung 19 ist die Spurbreite der Zone 2 und 3 in Abhängigkeit von der Fluenz bei verschiedenen Frequenzen und verschiedenen Pulsabständen gezeigt.

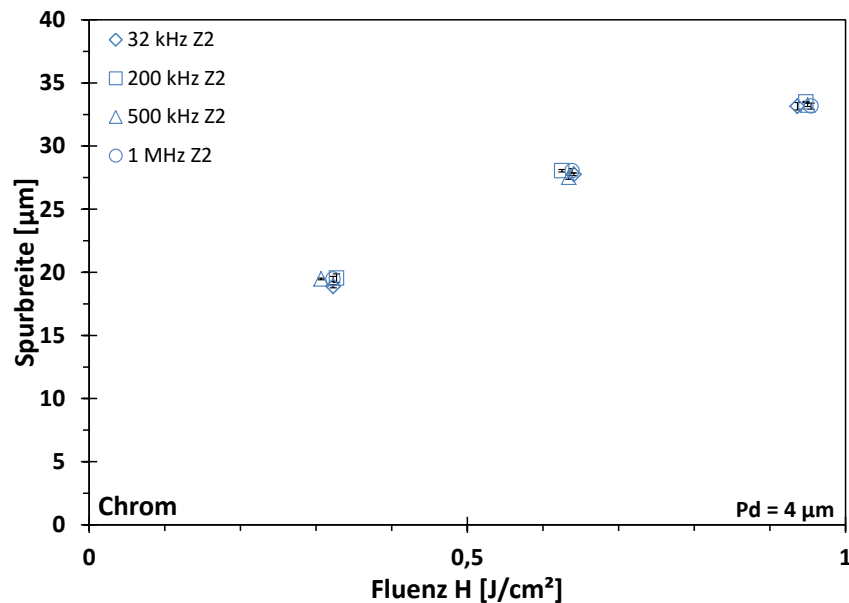


Abbildung 19: Spurbreite der Zone 2 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Frequenzen, Linienabstand 200 µm, Pulsdauer 200 fs, Pulsabstand 4 µm

In Abbildung 19 ist für das Abtragen mit einem Pulsabstand von 4 µm zu erkennen, dass eine Steigerung der Frequenz keine Auswirkungen auf die Spurbreite der Zone 2 hat. Die Spurbreite nimmt mit steigender Fluenz zu. Ein Abtrag entsprechend der Zone 3 konnte bei einem Pulsabstand von 4 µm nicht erreicht werden, da entweder Schmelzkugeln innerhalb der Spur zurück blieben oder das Substrat wird Verfärbt bzw. kommt es zur Rissbildung im Substrat. Der Pulsabstand 2 µm zeigt ein ganz ähnliches Verhalten wie in Abbildung 20 zu erkennen ist. Auch hier ändert sich die Spurbreite bei gleicher Fluenz aber höherer Frequenz nicht. Allerdings treten Veränderungen innerhalb der Zone 2 auf. Die Schmelzkugeln werden weniger aber größer. Zusätzlich werden die Schmelzkugeln ab einer Frequenz von 500 kHz mittig der Spur komplett entfernt was einen vollständigen Linienabtrag entsprechend der Zone 3 erzeugte. Es wird dabei aber auch das Substrat verfärbt bzw. geschädigt. Für gleichen Fluenzen nimmt die Spurbreite der Zone 3 mit größeren Frequenzen zu wie in Abbildung 20 zu sehen.

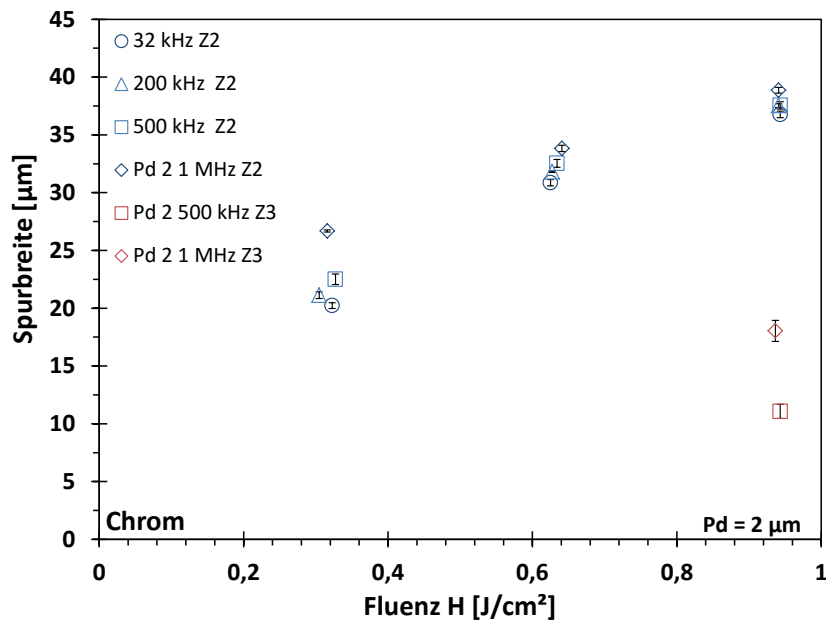


Abbildung 20: Spurbreite der Zone 2 und 3 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Frequenzen, Linienabstand 200 μm, Pulsdauer 200 fs, Pulsabstand 2 μm

Für den Pulsabstand 1 μm konnte bei der Vermessung der Zone 2 wie in Abbildung 21 gezeigt, gleich den anderen Pulsabständen, keine Veränderung der Spurbreite aufgrund einer Änderung der Frequenz festgestellt werden. Im Gegensatz zum Bearbeitungsergebnis mit 2 μm tritt keine Änderung der Spurbreite der Zone 3 auf. Allerdings konnte bei einer Frequenz von 1 MHz ein Linienabtrag der Zone 3 bei geringer Fluenzen erzeugt werden, als bei kleineren Frequenzen.

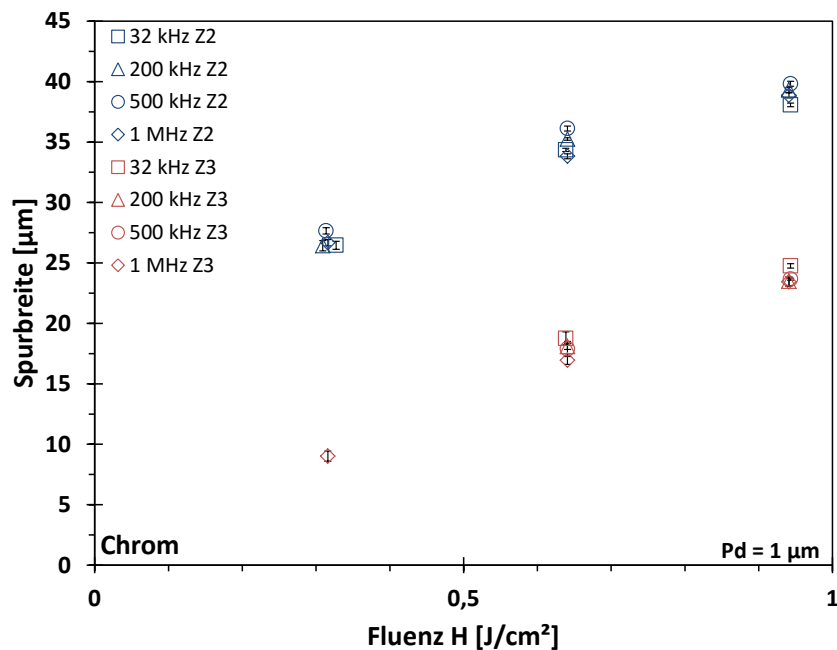


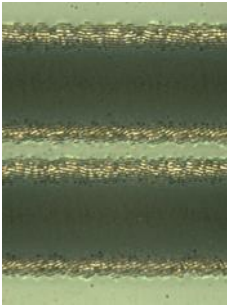
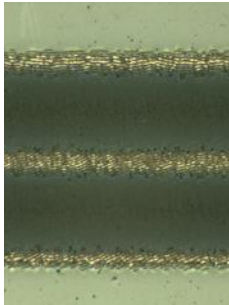
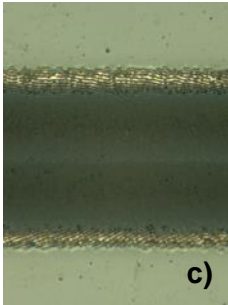
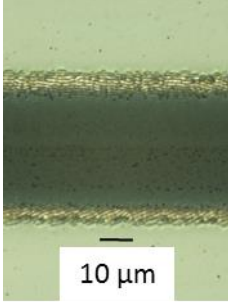
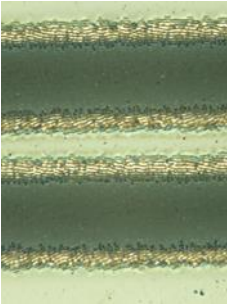
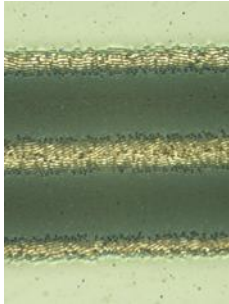
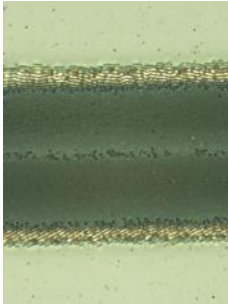
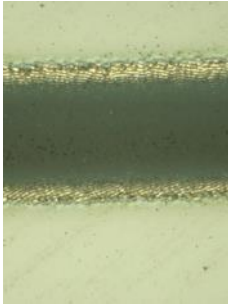
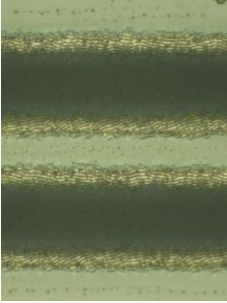
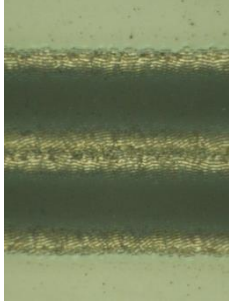
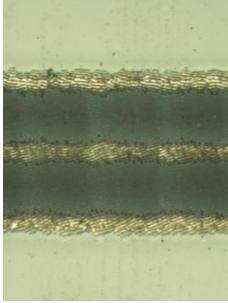
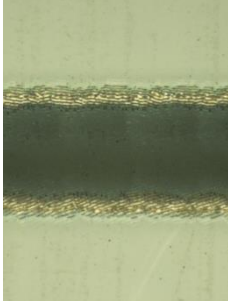
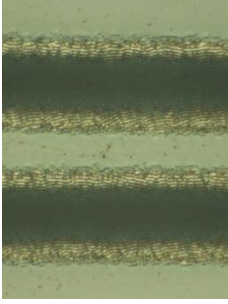
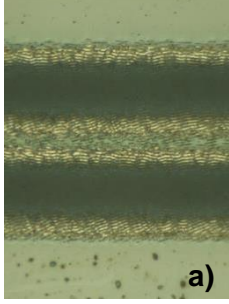
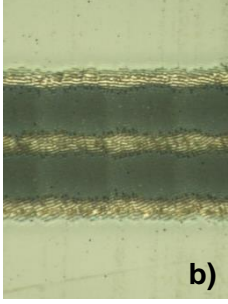
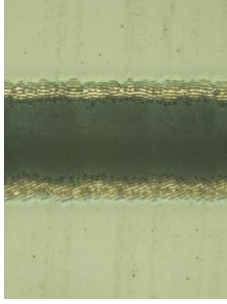
Abbildung 21: Spurbreite der Zone 2 und 3 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Frequenzen, Linienabstand 200 μm, Pulsdauer 200 fs, Pulsabstand 1 μm

Vergleicht man die Ergebnisse, so tritt ein Linienabtrag entsprechend der Zone 3 bei 32 kHz ab $0,4 \text{ J/cm}^2$ auf. Bei höheren Frequenzen tritt dies aufgrund von Wärmeakkumulation schon ab $0,31 \text{ J/cm}^2$. Infolge der Wärmeakkumulation besitzt das Schichtmaterial einen geringeren Reflexionsgrad, was dazu führt dass mehr Energie absorbiert wird als bei Raumtemperatur. Dies führt dazu, dass schon bei kleineren Fluenzen aber höheren Frequenzen ein erhöhter Abtrag innerhalb der Linie festgestellt wurde. Dies kann beispielhaft in der Abbildung 20 gesehen werden, wo bei gleicher Fluenz eine größere Spurbreite der Zone 3 bei größerer Pulsfrequenz erreicht wurde. Dieser Effekt ist mit höheren Fluenzen weniger stark ausgeprägt. Denn Je höher die Fluenz ist desto mehr Schichtmaterial wird abgetragen, was für den folgenden Puls weniger erwärmtes Material übrig lässt um von der Wärmeakkumulation zu profitieren. Als Beleg dafür kann die im vorigen Unterkapitel beschriebene sinkende Differenz zwischen den Spurbreiten der Zone 2 und 3 bei steigender Fluenz gesehen werden.

5.1.3 Variation des Linienabstandes

Die in den vorigen Kapiteln gewonnen Erkenntnisse wurde ein Parameterfeld für die flächige Strukturierung des Schichtmaterials zur Verfügung steht. Aus 5.1.1 kann entnommen werden dass ein Linienabtrag entsprechend der Zone 3 nur mit einem Pulsabstand von $1 \mu\text{m}$ bei einer Frequenz von 32 kHz möglich ist. Dazu waren Pulse mit einer Fluenz von $0,4 \text{ J/cm}^2$ notwendig. In 5.1.2 wurde gezeigt, dass ein Erreichen eines linienhaften Abtrags der Zone 3 ab einer Frequenz von 500 kHz auch mit einem größeren Pulsabstand von $2 \mu\text{m}$ möglich ist. Allerdings bilden sich dabei Risse im Substrat aus und es wird verfärbt. Daraus folgend kann ein Parametersatz von einem Pulsabstand von $1 \mu\text{m}$, einer maximalen Frequenz von 200 kHz sowie einer Fluenz höher als $0,4 \text{ J/cm}^2$ als optimal angesehen werden. Ab einer Fluenz von $0,7 \text{ J/cm}^2$ begann sich das Substrat zu verfärben. Folglich wurde in dem Fluenzbereich von $0,4 \text{ J/cm}^2$ bis $0,7 \text{ J/cm}^2$ die Linienabstände variiert um die Grenzen möglicher Strukturgrößen und Auflösungen zu ermitteln, aber auch um einen flächigen Abtrag zu realisieren. Die Bearbeitungsergebnisse sind in der folgenden Tabelle 8 gezeigt. In der Tabelle 8 sind die Bearbeitungsergebnisse in einer Übersicht dargestellt.

Tabelle 8: Übersicht der Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Linienabständen in Abhängigkeit der Fluenz bei einem Pulsabstand 1 μm und einer Frequenz von 200 kHz

40 μm	30 μm	20 μm	10 μm	
				0,7 J/cm ²
				0,6 J/cm ²
				0,5 J/cm ²
				0,4 J/cm ²

Aus der Tabelle 8 ist erkennbar, dass mit sinkendem Linienabstand die Breite der nicht ablatieren Schicht zwischen den zwei Linienabträgen abnimmt. Dabei wird der Steg schmaler, entsprechend der Verringerung des Linienabstands. Ebenfalls ist erkennbar, dass die Linien bei höheren Fluenzen breiter werden und dadurch der Steg schmaler wird.

Zuerst verschwindet dabei das unbearbeitete Schichtmaterial im Zentrum des Stegs, da es zu einem Überlappen der Zone 2 der beiden Linien kommt. Der kleinste Mitte zu Mitte Abstand der Linien (Pitch) bei dem ein Steg mit noch unbearbeitetem Schichtmaterial im Zentrum, wie in Abb. a) der Tabelle 8 gezeigt, vorliegt ist bei einem Linienabstand von $34\text{ }\mu\text{m}$ und einer Fluenz von $0,6\text{ J/cm}^2$. Der so erzeugte Steg besitzt eine breite von $14\text{ }\mu\text{m}$. Allerdings werden durch die hohen Fluenz auch die breitesten Einzellinien mit $33\text{ }\mu\text{m}$ erzeugt weshalb dazu ein großer Linienabstand benötigt wird, was die Auflösung einer Strukturierung einschränkt. Mit einer Fluenz von $0,4\text{ J/cm}^2$ und einem Linienabstand von $26\text{ }\mu\text{m}$ konnten Stege deren Oberfläche komplett der Zone 2 entspricht, ähnlich wie in der Tabelle im Bild b) zusehen, mit einer Breite von $11\text{ }\mu\text{m}$ realisiert werden. Durch die kleiner Fluenz und der daraus folgenden kleineren Spurbreite ist ein kleiner Linienabstand möglich wodurch die Auflösung um $22\text{ }\%$ erhöht werden kann. Verringert man weiter den Linienabstand wird er zunehmend schmaler bis mit anfänglich zufällig unterbrochen später zu Schmelzkugeln zerfällt. Diese werden mit weiter verringertem Linienabstand ebenfalls verdampft und es bleibt nur noch ein extrem dünner Streifen von Restmaterial übrig, der in der Mikroskop-Aufnahme in der Abbildung c) der Tabelle 8 als heller Streifen zwischen den zwei Linien erkennbar ist. Auch dieser Verschwindet bei weiterem Verringern des Linienabstandes. Ein sauberer flächiger Abtrag konnte ab einer Fluenz von $0,67\text{ J/cm}^2$, einem Pulsabstand von $1\text{ }\mu\text{m}$ und einem Linienabstand von $13\text{ }\mu\text{m}$ erzeugt werden. Die Flächenabtragsrate bei diesem Parameter war die größte mit $2,6\text{ mm}^2/\text{s}$ ohne dabei das Substrat zu beschädigen, weshalb er sich als Schruppbearbeitungsparameter zum schnellen flächigen Abtrag eignet. Die Bearbeitungsergebnisse sind in den Abb. 22 und 23 gezeigt. Bei kleineren Fluenzen sinkt die Abtragsrate.

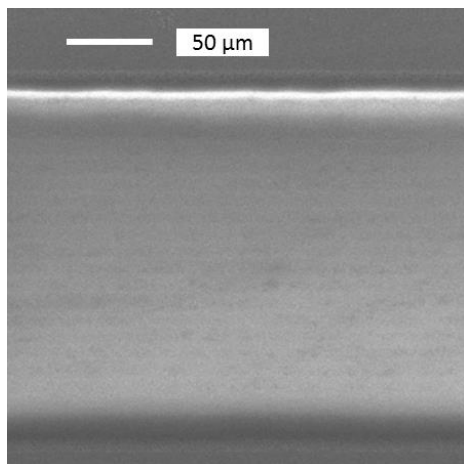


Abbildung 22: REM-Übersichtsbild eines flächigen Abtrags

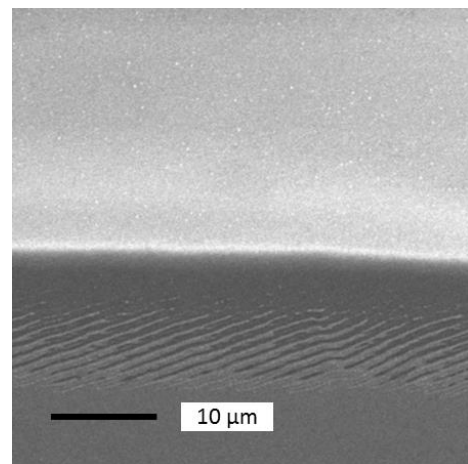
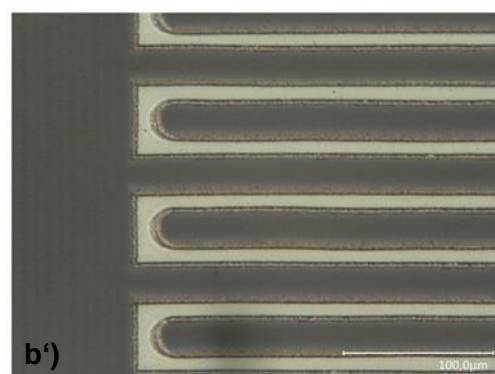
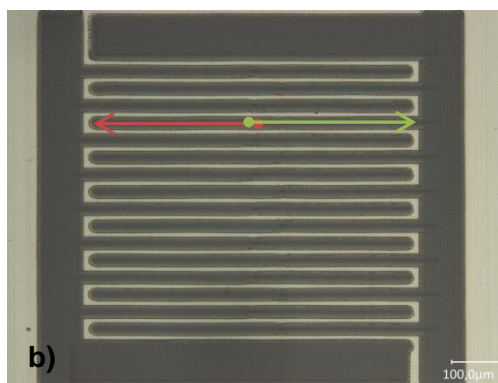
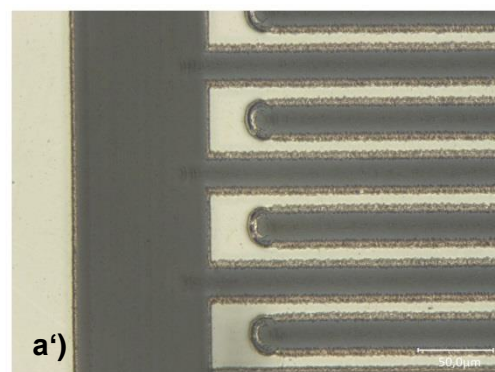
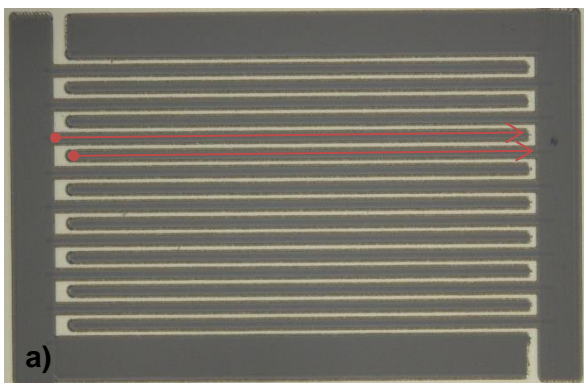


Abbildung 23: REM-Bild vom Rand des flächigen Abtrags

5.1.4 Strukturierungsbeispiel

In diesem Kapitel wird als Beispiel eine Mäanderstruktur durch Laser induziertes ablatieren der Chromschicht vorgestellt. Die Bearbeitung wurde mit einem Pulsabstand von $1\text{ }\mu\text{m}$, einer Fluenz von $0,5\text{ J/cm}^2$ und einer Frequenz von 200 kHz durchgeführt. Der flächige Abtrag wurde mit einem Linienabstand von $9\text{ }\mu\text{m}$ realisiert. Die Strukturierung der Stege erfolgte mit einem Linienabstand von $37\text{ }\mu\text{m}$ wodurch Stege mit noch unbearbeitetem Schichtmaterial im Zentrum mit einer Breite von $16\text{ }\mu\text{m}$ erzeugt wurden. Eine mit diesen Parametern erzeugte Beispielstruktur ist im Bild a) in der Tabelle 9 gezeigt. Die Bearbeitung der Struktur erfolgte unidirektional, was dazu führt, dass die Einstichstellen des Linienabtrags wie im Bild a') der Tabelle 9 zu erkennen innerhalb der Määnder zu sehen sind. Die sichtbaren Einstichstellen können vermieden werden, in dem die Einzellinien der Mäanderstruktur in zwei Schritten bidirektional, wie im Bild b) der Tabelle 9 gezeigt, erzeugt werden. Die Pfeile zeigen in die Richtung in der die beiden Bearbeitungsschritte durchgeführt wurden und die Kreise markieren ihre Einstichstellen. Um das Bearbeitungsergebnis weiter zu verbessern, wurde die Polarisationsrichtung um 90° gedreht dabei verkleinerte sich die Zone 2, was deutlich durch den Vergleich der Bilder a') und b') zu erkennen ist. Die Polarisationsrichtung wurde sonst nicht geändert.

Tabelle 9: Darstellung der a) unidirektionalen- , b) bidirektionalen Bearbeitungsergebnisse



5.2 Aluminium

5.2.1 Variation des Pulsabstandes

Zur Untersuchung des Einflusses des Pulsabstandes auf das Abtragen einer dünnen Aluminiumschicht wurden zuerst die möglichen Spurbreiten der Wechselwirkungszonen 1 und 2 berechnet. Dazu wurde die Formel (4) und die Schwellfluenzen der Zonen 2 und 3 von Aluminium genutzt. Die genutzten Schwellfluenzen gelten für Einzelpulse, weshalb bei der Berechnung der Spurbreiten keine Inkubations und Akkumulationseffekte die die Energieaufnahme verändern, wie in 2.1 beschrieben, berücksichtigt werden. Die so berechneten Spurbreiten sind in der Abbildung 24 in Abhängigkeit von der Fluenz gezeigt. In der Abbildung ist zusehen das sich bei einer Fluenz von $0,6 \text{ J/cm}^2$ eine Spurbreite von $10 \mu\text{m}$ der Zone 2 und ab $0,85 \text{ J/cm}^2$ sich $9 \mu\text{m}$ Spurbreite der Zone 3 ergibt. Mit einer Fluenz von $1,6 \text{ J/cm}^2$ ergibt sich wie in der Abbildung 24 zu sehen eine Spurbreite der Zone 2 von $24 \mu\text{m}$ und der Zone 3 von $20 \mu\text{m}$.

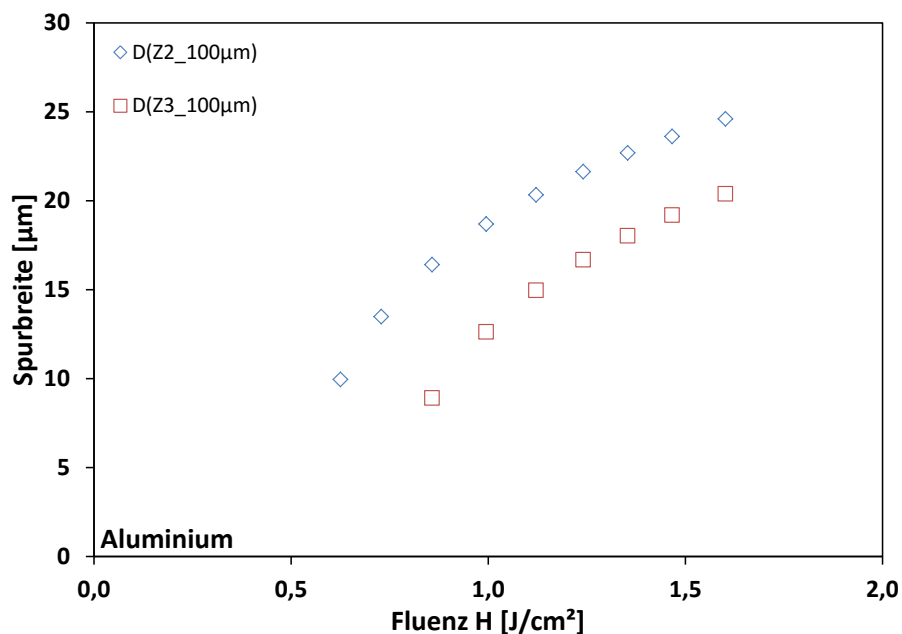
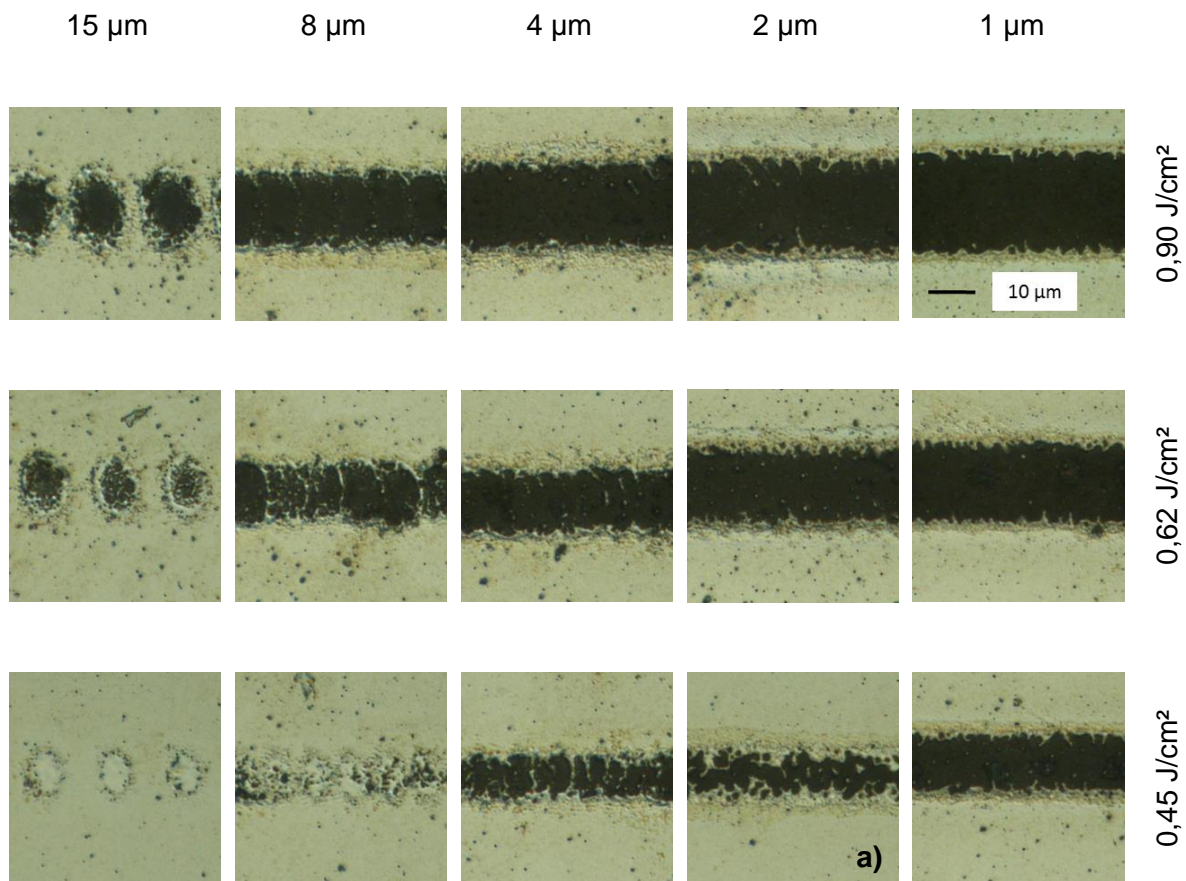


Abbildung 24: Abschätzung der möglichen Spurbreiten in Abhängigkeit von der Fluenz mittels der Formel (4) und den Schwellfluenzen für Einzelpulse von Aluminium

Der Einfluss verschiedener Pulsabstände wurde bei einer Frequenz von 32 kHz und einem Linienabstand von $200 \mu\text{m}$ untersucht. Es konnte ein Abtrag entsprechend der Zonen 2 und 3 ausgemacht werden. In der Übersicht sind die Bearbeitungsergebnisse der verschiedenen Pulsabstände in Abhängigkeit von der Fluenz.

Tabelle 10: Übersicht der Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Pulsabständen in Abhängigkeit der Fluenz bei einer Pulsfrequenz von 32 kHz und einem Linienabstand von 200 µm



In der Tabelle 10 ist zu erkennen, dass es mit 15 µm bei keiner der verwendeten Fluenzen es zu einem Linienabtrag entsprechend der Zone 2 gekommen ist. Dies konnte erst ab einem Pulsabstand von 10 µm und einer Fluenz von 0,55 J/cm² erreicht werden. Dabei kam es bereits im Zentrum der Einzelpulse zum lokalen ablatieren bis auf das Substrat, was darauf schließen lässt, dass Schichtmaterial verdampft worden ist. Generell ist in der Übersicht erkennbar, dass bei Aluminium eine starke Neigung zur Bildung von Schmelze vorliegt wie z.B. im Bild a) der Tabelle 10, in dem zu sehen ist wie Reste von Schmelze noch sehr unregelmäßig weit in die Spur hinein ragen. Ein größerer Anteil der Schmelze wird bei steigender Fluenz bzw. kleineren Pulsabständen verdampft wodurch sich Stege quer zur Bearbeitungsrichtung ausbilden. Diese zerfallen erst zu Bruchstücke, durch weiteres Steigern der genannten Parameter, bis sie nur noch als kleine Schmelzkugeln auf dem Substrat zurückbleiben. Durch die Schmelze wurde kein nennenswerter Aufwurf am Rand der Spur erzeugt. Ab einem Pulsabstand von 2 µm kommt es nicht mehr zur Ausbildung der Stege selbst mit geringen Fluenzen, sondern es entsteht ein unsauberer Abtrag bis auf das Substrat mit Schmelzresten die vom Rand aus weit in die Spur hinein ragen. Der unsaubere Rand des Abtrags wird bei kleineren Pulsabständen und höheren Fluenz

wieder glatter und es bleibt nur noch wenig wieder erstarrte Schmelze am Rand übrig. Die Spurbreite in Abhängigkeit der Fluenz für verschiedene Pulsabstände ist in der Abbildung 25 dargestellt.

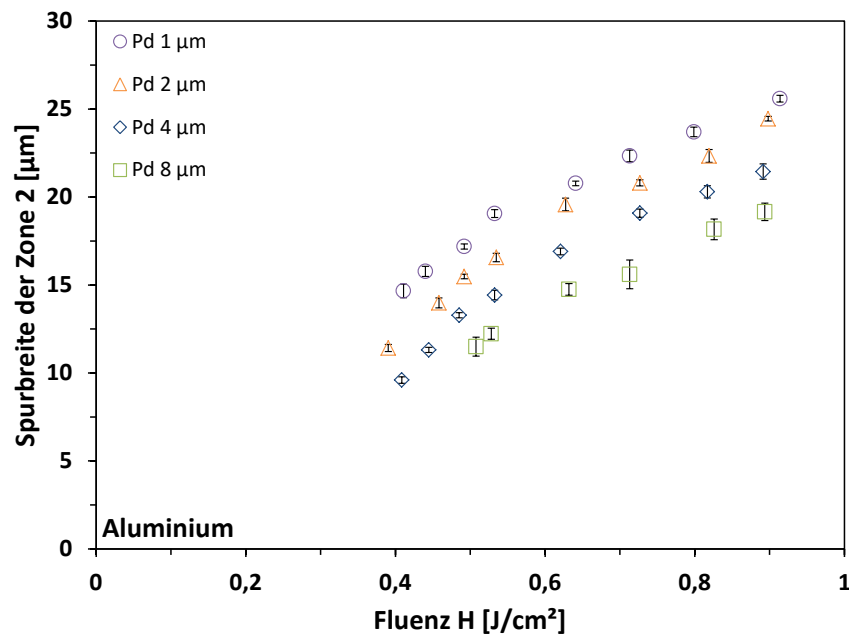


Abbildung 25: Spurbreite der Zone 2 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Pulsabständen, Frequenz 32 kHz, Linienabstand 200 µm, Pulsdauer 200 fs

In Abbildung 25 ist gezeigt, dass die Breite der linienhaften Bearbeitung der Zone 2 anwächst bei steigender Fluenz und sinkendem Pulsabstand. Die Spurbreiten reichen von 25 µm bei 1 µm Pulsabstand und 0,9 J/cm² bis 10 µm bei 4 µm und 0,4 J/cm². Das Anwachsen der Spurbreiten kann auf den steigenden vorgeschädigten Bereich und der steigenden Energie pro Strecke bei sinkendem Pulsabstand zurückgeführt werden. Das Anwachsen wird allerdings dadurch beschränkt, dass ab einer gewissen Fluenz der Einzelpuls immer weniger erwärmtes Material für den Folgepuls übrig lässt, was zu einer erhöhten Bestrahlung des größtenteils transparenten Substrats führt. Was dazu führt, dass dieser Effekt bei sehr hoher Fluenz an Bedeutung verliert. Dies zeigt sich auch in Abbildung 25. Darin kann gesehen werden, dass die Differenz zwischen der Spurbreite von 1 µm und 2 µm Pulsabstand ab einer Fluenz von 0,7 J/cm² kleiner wird. Die Fluenz ab der eine Verringerung des Anwachsens Eintritt ist stark von der Schichtdicke abhängig. Berechnet man die Schwellfluenz und Fokusradius für einen Pulsabstand von 8 µm erhält man 0,36 J/cm² sowie 14,2 µm als Ergebnis. Der berechnete Fokusradius weicht 14 % vom gemessenen ab und ein Linienabtrag der Zone 2 konnte erst ab einer Fluenz von 0,45 J/cm² erreicht werden. Berechnet man dies für einen Pulsabstand von 1 µm erhält man 0,27 J/cm² und 16,4 µm als Ergebnis. Der berechnete Fokusradius entspricht dem gemessenen und mit der sich daraus ergebenden Fluenz konnte kein Linienabtrag erreicht werden.

Der dazu verwendete LIU-Plot befindet sich im Anhang Teil 1. Der Linienabtrag der Zone 3 verhält sich wie der der Zone 2 wie in Abbildung 26 zusehen.

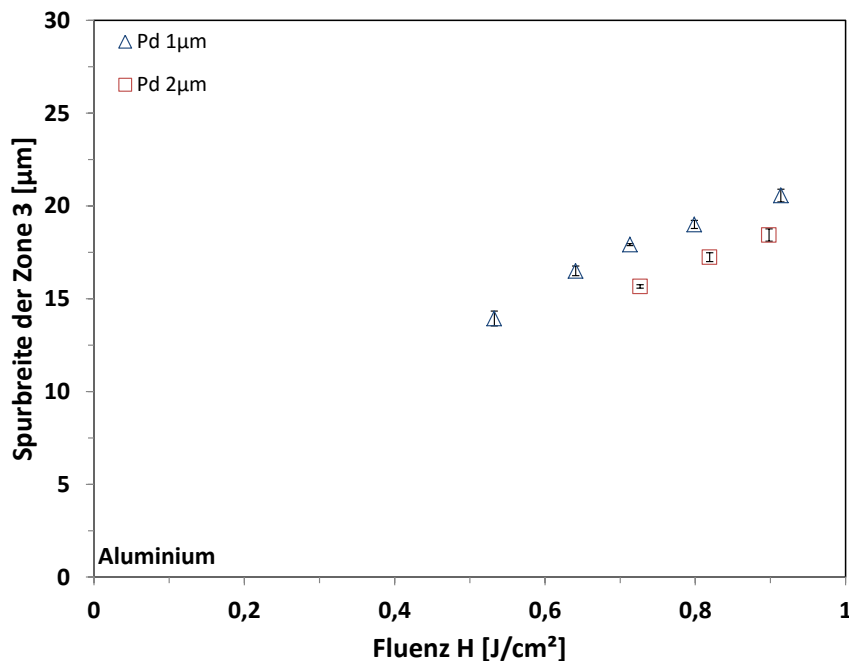


Abbildung 26: Spurbreite der Zone 3 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Pulsabständen, Frequenz 32 kHz, Linienabstand 200 µm, Pulsdauer 200 fs

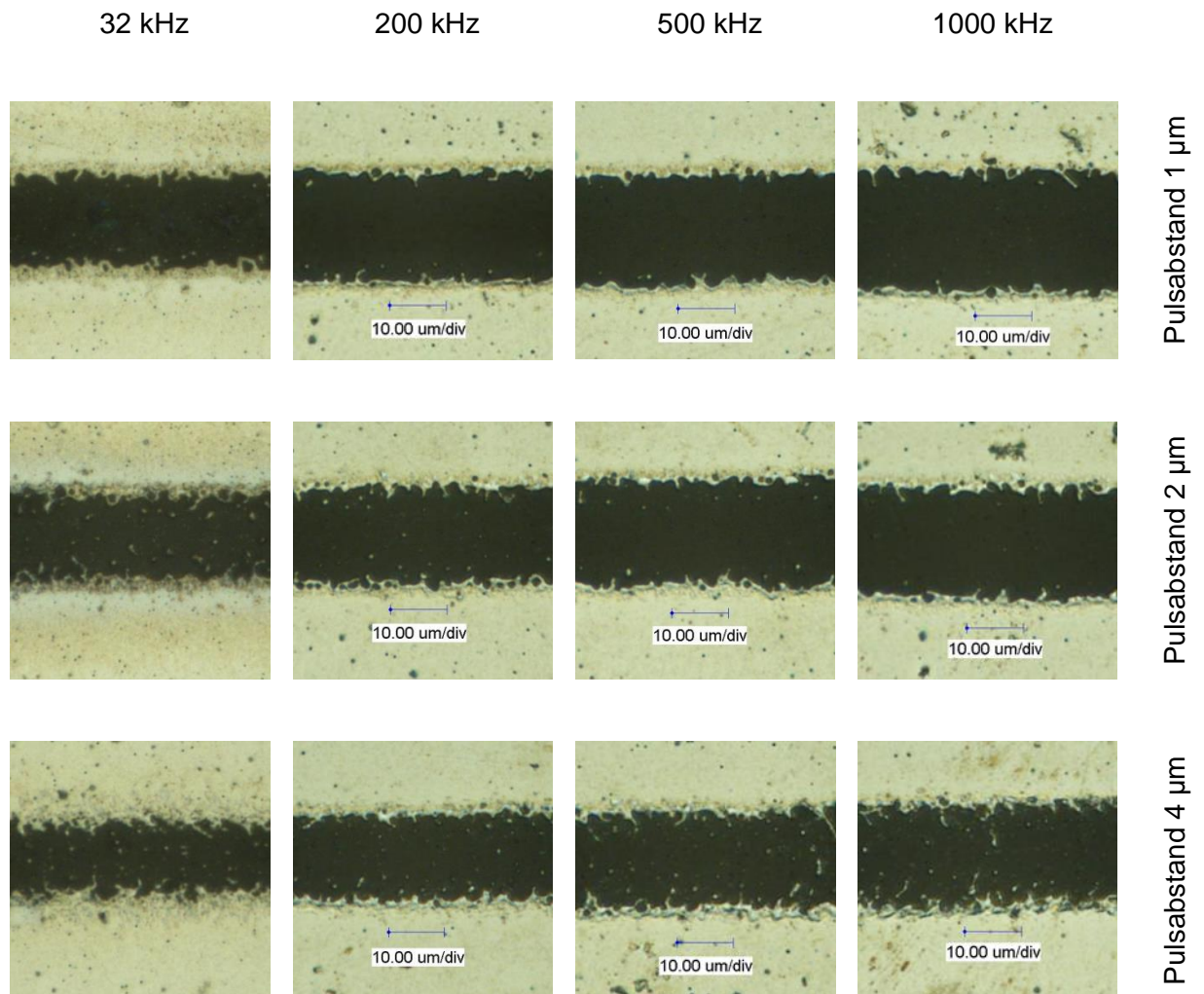
Die Breite der Zone 3 wächst bei steigender Fluenz sowie bei kleiner werdenden Pulsabstand. Die kleinsten Fluenzen der jeweiligen Pulsabstände in der Abbildung 26 sind auch die kleinsten Fluenzen bei der eine linienhafte Bearbeitung der Zone 3 erzielt wurde. Ebenfalls ist in Abbildung 26 zu sehen, dass bei den verschiedenen Pulsabständen die kleinsten Spurbreiten sich in einem Bereich von 14 bis 16 µm bewegt. Berechnet man die dafür eingesetzte Streckenenergie, zeigt sich, dass diese nicht konstant sondern bei schrumpfenden Pulsabstand ebenfalls sinkt, da die notwendige mittlere Leistung wesentlich langsamer abnimmt als die Markierungsgeschwindigkeit zunimmt. Dies lässt sich wieder mit dem größer werdenden vorgeschädigten Bereich durch den Vorgängerpuls erklären. Die Akkumulation von Wärme kann bei einem zeitlichen Abstand der Pulse von 32 µs als Ursache vernachlässigt werden. Eine Beschädigung des Substrats konnte nicht festgestellt werden. Subtrahiert man die Breite der Zone 3 von der Breite der Zone 2 bei gleichem Pulsabstand, so zeigt sich, dass die Differenz mit zunehmender Fluenz sinkt.

5.2.2 Variation der Frequenz

In diesem Kapitel wird die Auswirkung der verschiedenen zur Verfügung stehenden Frequenzen für das Schichtmaterial Aluminium untersucht. Die Bearbeitungsergebnisse mit verschiedenen Frequenzen in Abhängigkeit vom Pulsabstand werden in der Übersicht

gezeigt. Bei allen wurde eine Fluenz von $0,72 \text{ J/cm}^2$, eine Pulsdauer von 200 fs sowie ein Linienabstand von $200 \text{ }\mu\text{m}$ verwendet.

Tabelle 11: Übersicht der Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Frequenzen in Abhängigkeit des Pulsabstandes bei einer Fluenz von $0,72 \text{ J/cm}^2$, einer Pulsdauer von 200 fs und einem Linienabstand von $200 \text{ }\mu\text{m}$



In der Tabelle 11 ist zu erkennen, dass mit höheren Frequenzen ein sauberer Abtrag mit weniger Schmelzrückständen innerhalb der Spur realisiert wird. Dies kann auf den schnelleren Energieeintrag zurückgeführt werden. Die Restschmelze eines Pulses konnte sich nicht schnell genug Abkühlen, weshalb sie den Folgepuls besser absorbiert, was zu ihrer vollständigen Verdampfung führt. Dies betrifft vor allem die einzelnen Schmelzreste innerhalb der Spur und weniger die Randbereich der Spur. Dies kommt vermutlich daher, dass die Schmelzreste sich fast ausschließlich über Wärmestrahlung und Konvektion Abkühlen können und nicht wie der Randbereich auch durch Wärmeleitung in die übrige Schicht. Dies ist sehr gut in der Übersicht an den Bearbeitungsergebnissen bei einem Pulsabstand von $2 \text{ }\mu\text{m}$ zu sehen. Die Abbildung 27 zeigt die Spurbreiten des Linienabtrags entspre-

chend der Zone 2 in Abhängigkeit von der Fluenz bei verschiedenen Frequenzen bei einem Pulsabstand von $4\text{ }\mu\text{m}$.

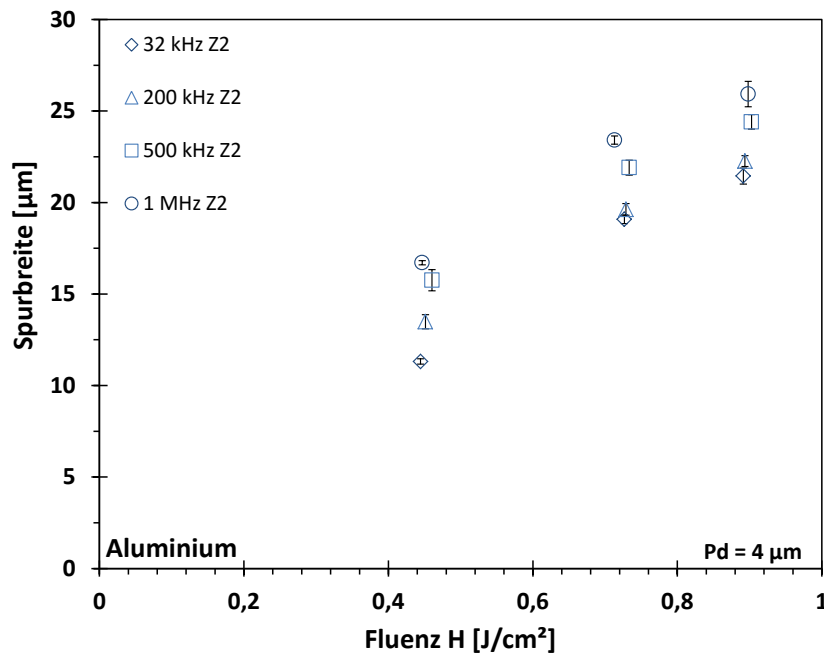


Abbildung 27: Spurbreite der Zone 2 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Frequenzen, Linienabstand $200\text{ }\mu\text{m}$, Pulsdauer 200 fs , Pulsabstand $4\text{ }\mu\text{m}$

In der Abbildung 27 kann gesehen werden, dass die größten Spurbreiten bei einer Frequenz von 1 MHz erreicht wurden. Die kleinsten wurden bei einer Frequenz von 32 kHz erzielt. Der Linienabtrag war mit einer Frequenz von 1 MHz $5\text{ }\mu\text{m}$ größer als mit 32 kHz bei gleicher Fluenz. Das die Spuren mit höherer Frequenz breiter werden lässt auf eine gesteigerte Wärmeakkumulation bei höheren Frequenzen schließen. Die Untersuchung der verschiedenen Frequenzen zeigt dass mit keiner Frequenz ein vollständiger Linienabtrag der Zone 3 erzielt werden konnte, da sich bei allen noch Schmelzreste innerhalb der Spur befanden. In der Abbildung 28 ist die Spurbreite der Zone 2 und 3 in Abhängigkeit der Fluenz bei verschiedenen Pulswiederhol frequenzen mit einem Pulsabstand von $2\text{ }\mu\text{m}$ gezeigt. Auch hier zeigt sich, dass die Spurbreite zunimmt bei steigender Frequenz und gleicher Fluenz was auf die Folgen der Wärmeakkumulation, die in Kapitel 2.1 beschrieben werden, zurückgeführt werden kann. Die Spurbreiten der Zone 2 die mit einer Frequenz von 1 MHz erzeugt wurden sind um $3\text{ }\mu\text{m}$ größer als die mit 32 kHz , bei gleicher Fluenz. Ebenfalls konnte ein Linienabtrag der Zone 3 mit einer Frequenz von 1 MHz bei Fluenz von $0,4\text{ J}/\text{cm}^2$ erzeugt werden wofür bei 32 kHz $0,7\text{ J}/\text{cm}^2$ notwendig sind. Dies kann auch mit den Folgen durch Wärmeakkumulation erklärt werden.

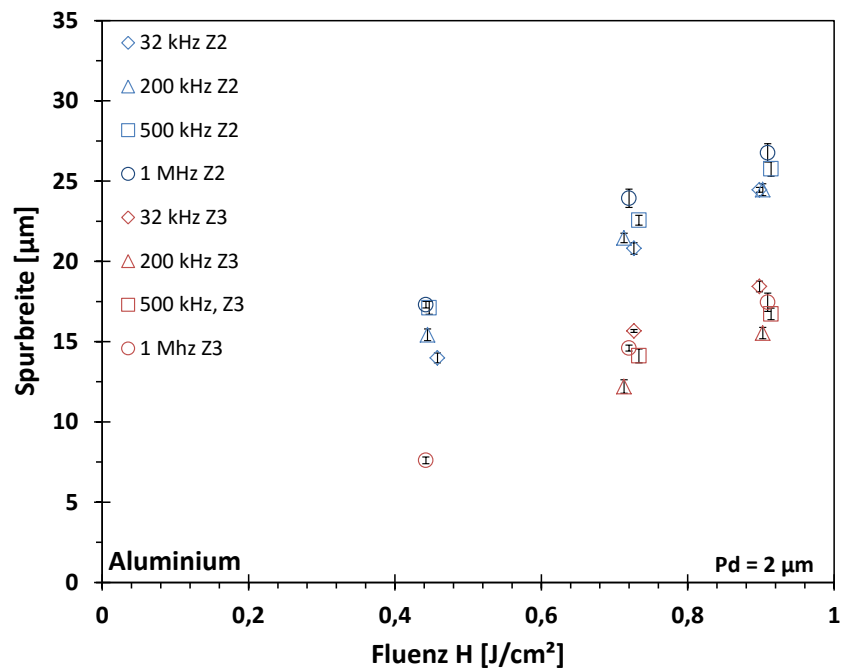


Abbildung 28: Spurbreite der Zone 2 und 3 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Frequenzen, Linienabstand 200 µm, Pulsdauer 200 fs, Pulsabstand 2 µm

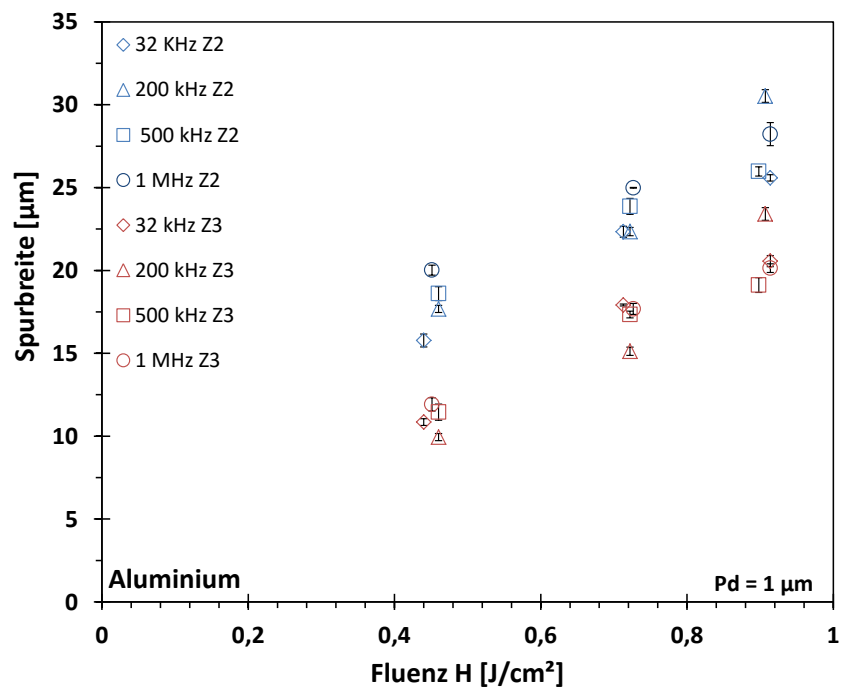


Abbildung 29: Spurbreite der Zone 2 und 3 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Frequenzen, Linienabstand 200 µm, Pulsdauer 200 fs, Pulsabstand 1 µm

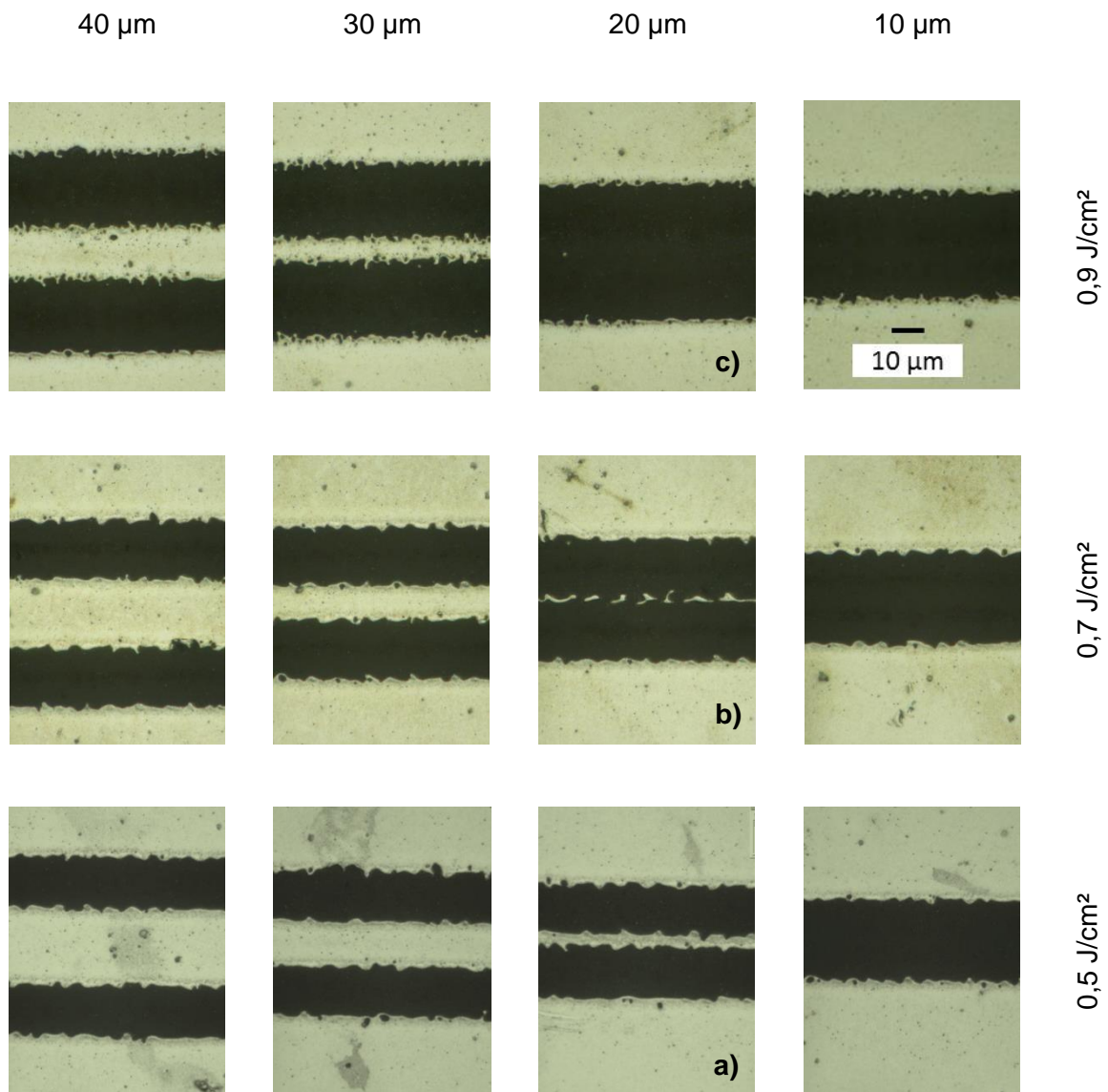
In der Abbildung 29 sind die Spurbreiten in Abhängigkeit von der Fluenz bei einem Pulsabstand von 1 µm eingetragen. In der Abbildung 29 kann man sehen das die Breite der linienhaften Bearbeitung der Zone 2 mit steigender Frequenz bei gleicher Fluenz ebenfalls Ansteigt. Die Spurbreite der Zone 2 ist mit einer Frequenz von 1 MHz ist um 4 µm größer als mit 32 kHz bei einer Fluenz von 0,4 J/cm². Bei einer Fluenz von 0,9 J/cm² beträgt der

Unterschied nur noch 2 μm . Ein Aufwurf im Randbereich konnte nicht festgestellt werden. Die Menge an Schmelzrückständen am Rand der Spur die noch in sie hineinreichen ist bei allen Frequenzen gleich und unterscheidet sich nur zwischen den verschiedenen Pulsabständen. Die Breite der linienhaften Bearbeitung der Zone 3 bleibt dagegen fast unverändert. Dies liegt daran das bei einem Pulsabstand von 1 μm schon ab 32 kHz und einer Fluenz von 0,72 J/cm² kaum noch Schmelzrückstände innerhalb oder nahe des Randes zurück blieben.

5.2.3 Variation des Linienabstandes

In diesem Unterkapitel werden nun die möglichen Strukturgrößen ermittelt in dem der Linienabstand variiert wird. Das dazu zur Verfügung stehende Parameterfeld wurde in den vorigen Kapiteln bereits eingeschränkt. Um eine linienhafte Bearbeitung der Zone 3 zu realisieren können 1 μm und 2 μm als Pulsabstand genutzt werden. Für einen Pulsabstand von 1 μm wurde eine Fluenz von 0,45 J/cm² benötigt um bei einer Frequenz von 1 MHz eine Spurbreite der Zone 3 von 11 μm zu erzeugen. Da die Breite der Zone 3 sich bei den verschiedenen Frequenzen sehr wenig verändert, sich jedoch bei höheren Fluenzen weniger Schmelzrückstände im Randbereich befinden eignet sich 1 MHz besonders zur Realisierung von kleinen Strukturen. Der Pulsabstand eignet sich aufgrund des relativ zu den anderen Pulsabständen wenig ausgefransten Rand sowie das dadurch, aufgrund der geringen Fluenz, die kleinste Spurbreite der Zone 3 von 10 μm erzeugt wird. Aufgrund der hohen Bearbeitungsgeschwindigkeit kann man den Pulsabstand von 2 μm bei einer Fluenz von 0,9 J/cm², sowie einer Frequenz von 1 MHz, für eine schnelle flächige Bearbeitung nutzen. Die Breite der dadurch erzeugten linienhaften Bearbeitung bis auf das Substrat beträgt 18 μm . Die Zone 3 mit einem Pulsabstand von 1 μm und gleicher Fluenz ist zwar um 3 μm Breiter, benötigt allerdings eine größere Bearbeitungszeit. Die Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Linienabständen in Abhängigkeit der Fluenz mit einem Pulsabstand von 1 μm und einer Pulswiederholfrequenz von 1 MHz sind in der Tabelle 11 gezeigt. In der Tabelle ist zu sehen, dass der Steg von unbearbeitetem Schichtmaterial mit höheren Fluenzen schmaler wird, da die einzelnen Linien bei gleichem Linienabstand breiter werden und dadurch der Steg zwischen ihnen dünner. Ebenfalls wird der Steg bei sinkendem Linienabstand bei gleicher Fluenz kleiner, weil die Einzellinien näher zusammen sind, wie in der Tabelle 11 zu erkennen. Der schmalste Steg konnte bei einer Fluenz von 0,5 J/cm² und einem Linienabstand von 20 μm mit einer Breite von 9 μm , wie im Bild a) der Tabelle 11 zu sehen. Das zeigt, dass es mit diesem Parametersatz möglich ist feine Strukturen mit einer hohen Auflösung zu fertigen weshalb er sich als Feinbearbeitungsparametersatz eignet.

Tabelle 12: Übersicht der Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Linienabständen in Abhängigkeit der Fluenz bei einem Pulsabstand 1 μm und einer Frequenz von 1 MHz



Mit größeren Fluenzen wird ein größerer Linienabstand benötigt da die Breite der Einzellinien ansteigt, was aber wiederum die Auflösung verringern würde. Wird der Linienabstand weiter verringert oder die Fluenz erhöht wird der Steg zunächst porös und später dann wie im Bild b) der Tabelle 11 zu sehen zufällig unterbrochen. Die Reststücke des Steges werden anschließend immer kleiner bis nur noch vereinzelt Schmelzkugeln unregelmäßig zurück bleiben wie im Bild c) zu erkennen. Eine flächige Bearbeitung konnte ab einer Fluenz von 0,9 J/cm² und einem Linienabstand von 17 μm erzielt werden. Die Flächenabtragsrate beträgt dabei 17 mm²/s. Mit einem Pulsabstand von 2 μm und einer Fluenz von 0,9 J/cm², sowie 1 MHz Puls wiederhol frequenz konnte ebenfalls ein flächiger Abtrag erzeugt werden. Die Flächenabtragsrate beträgt bei diesem Parameter 34 mm²/s da die Bearbeitungsgeschwindigkeit doppelt so groß ist und die Einzellinien nur um 12 %

dünnere sind als die mit einem Pulsabstand von 1 μm . Durch seine größere Flächenabtragsrate eignet sich der Parametersatz mit 2 μm Pulsabstand als Schruppbearbeitungsparametersatz.

5.3 Kupfer

5.3.1 Variation des Pulsabstandes

Um die Beeinflussung des Pulsabstandes auf das Ablationsergebnis einer dünnen Kupferschicht zu untersuchen wurde zunächst die möglichen Spurbreiten der Zone 2 abgeschätzt. Dazu wurde die Formel (4) und die Schwellfluenz für Einzelpulse genutzt. Die geschätzten Spurbreiten sind in Abbildung 30 in Abhängigkeit von der Fluenz gezeigt. In der Abbildung ist zu sehen, dass sich die Spurbreite von 28 μm bei einer Fluenz von 0,4 J/cm² auf 38 μm bei einer Fluenz von 1,6 J/cm² zunimmt. Die Größe der Spur wird

dabei nur von der Fluenz bestimmt, da Spurverbreiternde Effekte durch z.B. Wärmeakkumulation nicht berücksichtigt werden.

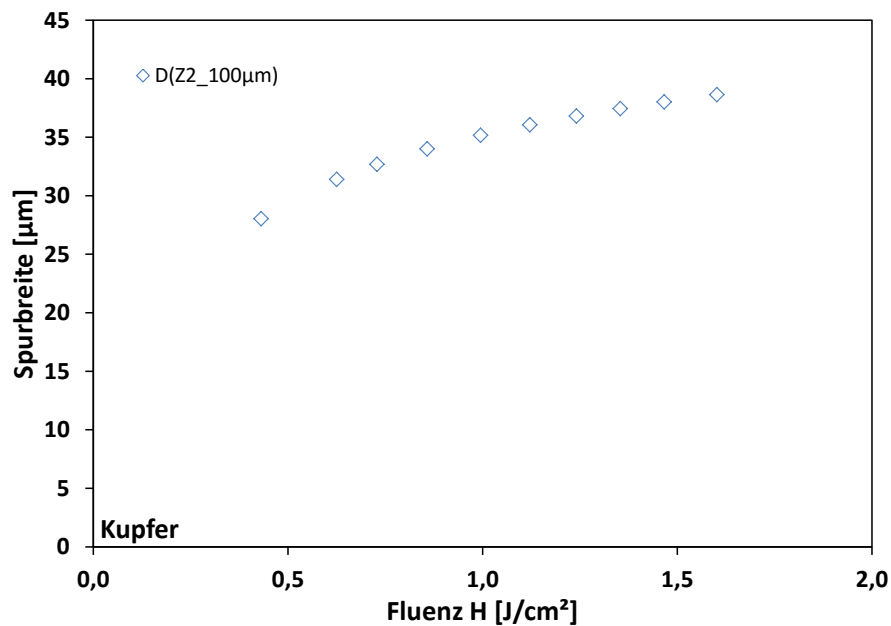
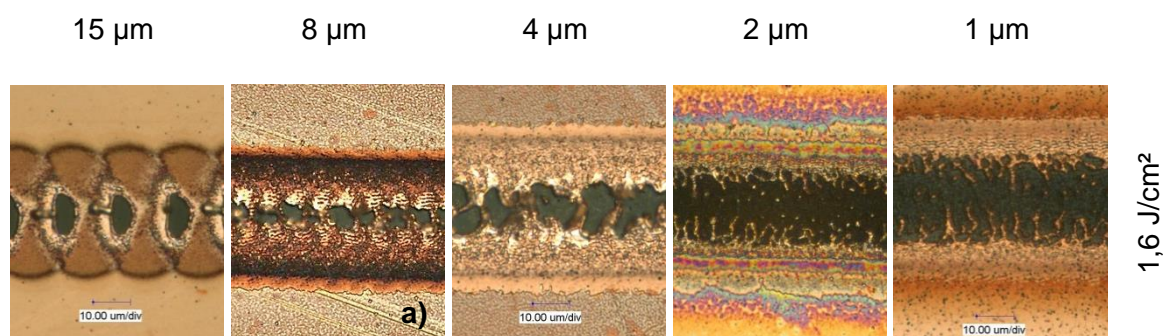
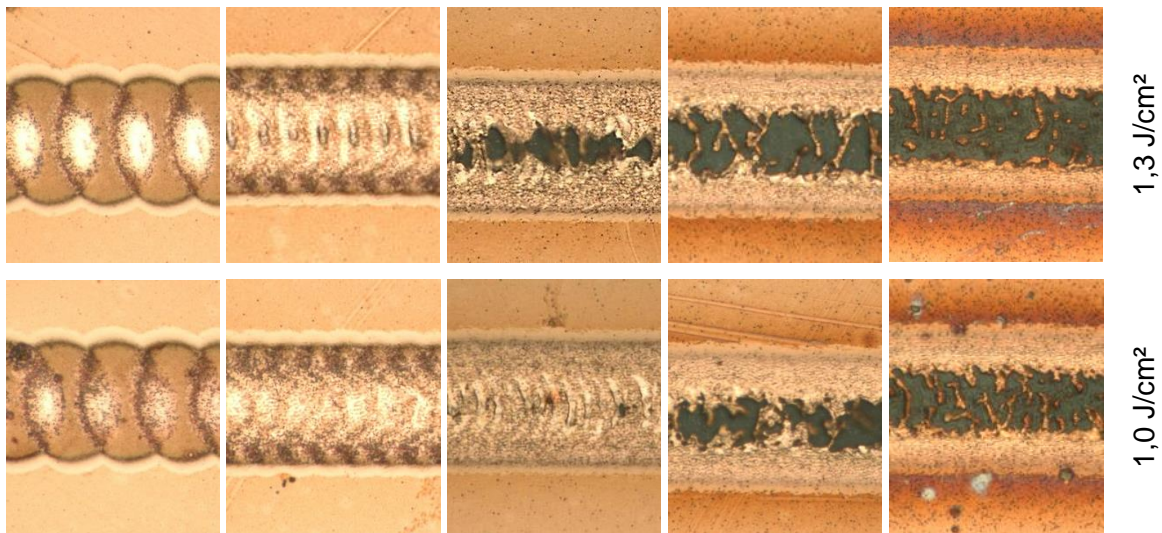


Abbildung 30: Abschätzung der möglichen Spurbreiten in Abhängigkeit von der Fluenz mittels der Formel (4) und den Schwellfluenzen für Einzelpulse von Kupfer

Der Einfluss des Pulsabstands wurde bei einer Frequenz von 32 kHz, einem Linienabstand von 200 µm und einer Pulsdauer von 200 fs untersucht. Die Bearbeitungsergebnisse sind für verschiedenen Pulsabständen in Abhängigkeit von der Fluenz in der Tabelle 13 gezeigt. In der Tabelle 13 ist erkennbar, dass ab 15 µm und einer Fluenz von 1,0 J/cm² sich in den überlappenden Bereichen bereits Schmelze vorhanden ist. Ausgehend von den Betrachtungen in Kapitel 2.1 kann vermutet werden, dass die Schmelze durch das Verdampfen der überhitzten Schmelze, aufgrund der erhöhten Energiekonzentration nahe unter der Schichtoberfläche, teilweise ausgeworfen wird.

Tabelle 13: Übersicht der Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Pulsabständen in Abhängigkeit der Fluenz bei einer Pulsfrequenz von 32 kHz und einem Linienabstand von 200 µm





Ein Teil dieser ausgeworfenen Schmelze erstarrt jedoch vermutlich mit Kontakt zum Schichtmaterial, wodurch sich auf den Stegen zwischen den lokal komplett abgetragenen Stellen eine kleine Spitzte aus wiedererstarrender Schmelze bildet. Diese werden bis zu einem Pulsabstand von $10\text{ }\mu\text{m}$ immer größer. Bei einem Pulsabstand von $10\text{ }\mu\text{m}$ und einer Fluenz von $1,6\text{ J/cm}^2$ werden diese bis zu $6\text{ }\mu\text{m}$ hoch. Dabei entspricht der Abstand der Spitzten größtenteils dem Pulsabstand. Bei kleineren Pulsabständen werden sie wieder kleiner, da sie bei zu geringen Pulsabständen durch den nachfolgenden Puls wieder geschmolzen bzw. sogar verdampft werden. Die ausgeprägte Schmelzbildung führt auch dazu, dass sich ab einem Pulsabstand von $8\text{ }\mu\text{m}$ keine Stege quer zur Bearbeitungsrichtung deren Abstand mit dem Pulsabstand übereinstimmen ausbilden, wie in der Tabelle 13 im Bild a) zu sehen. Wird die Schicht bis zum Substrat ablatiert, bildet sich zunächst ein sehr unsauber abgetragener Rand innerhalb der Spur aus. Ab hoher Fluenz wird dieser bei kleineren Pulsabständen wieder glatter, wie in der Tabelle 13 erkennbar. Allerdings bleiben Reste von Schmelze innerhalb der Spur zurück, weshalb ein Linienabtrag der Zone 3 selbst bei der höchsten einstellbaren Fluenz und dem kleinsten Pulsabstand nicht erreicht wurde. Die starke Bildung von Schmelze kann auf die relativ große Schichtdicke und die hohe Wärmeleitfähigkeit von Kupfer zurückgeführt werden. Ebenfalls konnten keine Bildung von Riffeln festgestellt werden. Es wurde bei keiner Fluenz das Substrat, wie in der Tabelle 13 zusehen, beschädigt. In den Abbildungen 29 und 30 kann gesehen werden, wie sich aufgrund der Erhöhung der Fluenz von $1,4\text{ J/cm}^2$ auf $1,6\text{ J/cm}^2$ wie der Schmelzpool bei $1,4\text{ J/cm}^2$ verschwindet und sich bei $1,6\text{ J/cm}^2$ die Spitzten bilden.

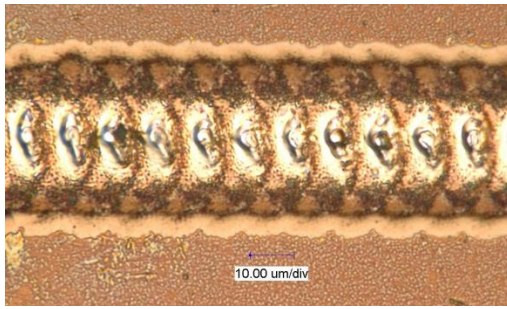


Abbildung 31: Bildung von Schmelzpool
Pulsabstand 10 µm, Frequenz 32 kHz,
Fluenz 1,4 J/cm², Pulsdauer 200 fs

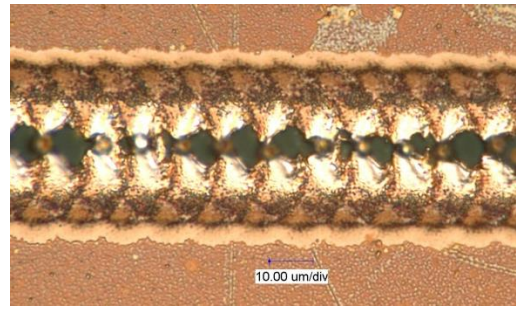


Abbildung 32: Bildung von Auswurfspitzen
Pulsabstand 10 µm, Frequenz 32 kHz,
Fluenz 1,6 J/cm², Pulsdauer 200 fs

In der Abbildung 33 sind die Ergebnisse der Vermessung der erzeugten Spurbreiten entsprechend der Zone 2 in Abhängigkeit von der Fluenz bei verschiedenen Pulsabständen dargestellt.

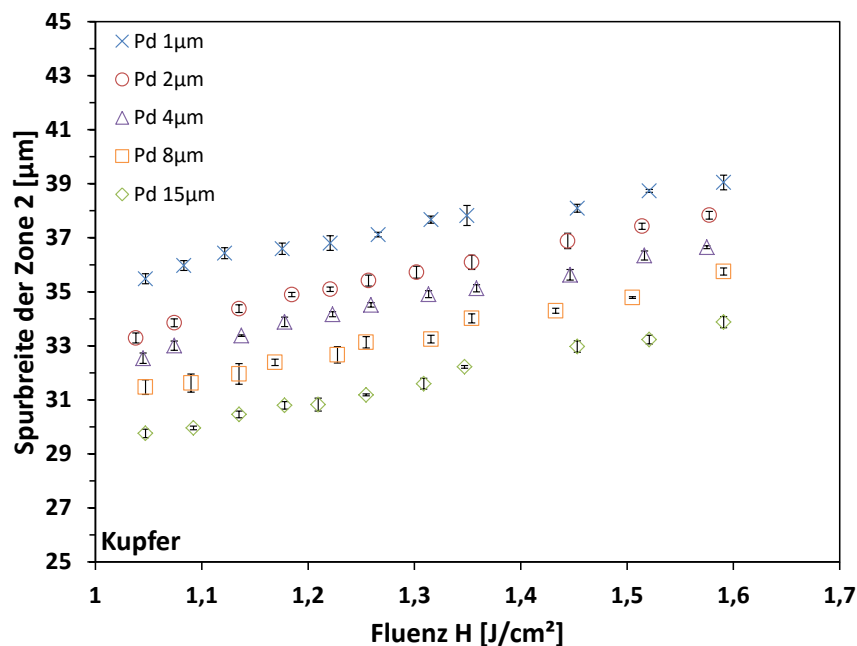


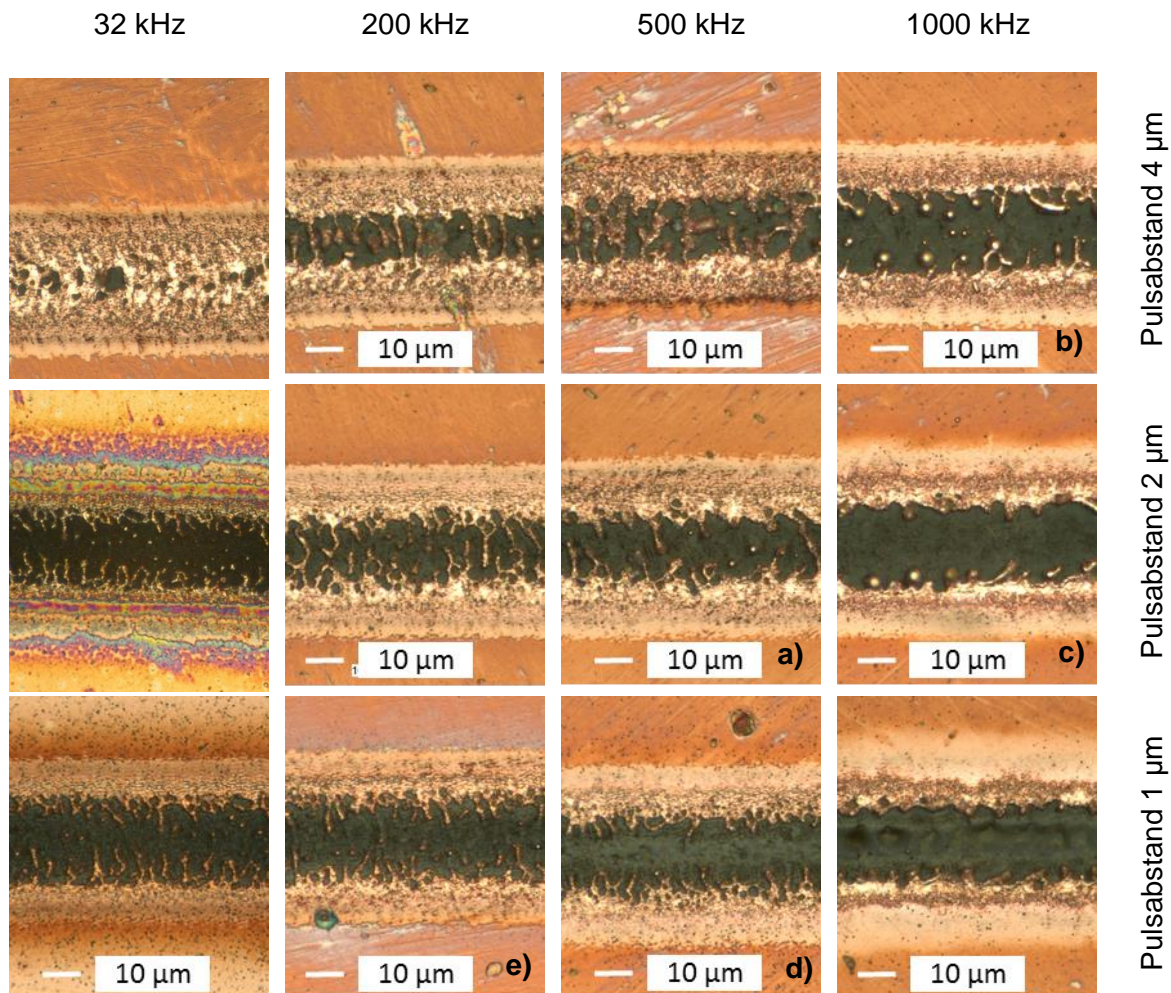
Abbildung 33: Spurbreite der Zone 2 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Pulsabständen, Frequenz 32 kHz, Linienabstand 200 µm, Pulsdauer 200 fs

In Abbildung 33 kann gesehen werden, dass mit kleinerem Pulsabstand breitere Spuren der Zone 2 entstehen. Mit einem Pulsabstand von 1 µm wurden bei einer Fluenz von 1,6 J/cm² eine Spurbreite entsprechender der Zone 2 von 39 µm und mit einer Fluenz von 1 J/cm² eine 35 µm breite Spur erzeugt. Die Spurbreiten mit einem Pulsabstand von 1 µm und 15 µm unterscheiden sich um 6 µm bei allen verwendeten Fluenzen. Dies kann wieder mit dem größer werdenden vorgeschädigten Bereich und der verstärkten Wärmeakkumulation aufgrund des kleiner werdenden Pulsabstandes erklärt werden.

5.3.2 Variation der Frequenz

In diesem Abschnitt wird der Effekt von verschiedenen Frequenzen auf den Bearbeitungsprozess beschrieben. Die Tabelle 14 zeigt die Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Frequenzen in Abhängigkeit von dem Pulsabstand.

Tabelle 14: Übersicht der Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Frequenzen in Abhängigkeit des Pulsabstandes bei einer Fluenz von $1,6 \text{ J/cm}^2$, einer Pulsdauer von 200 fs und einem Linienabstand von $200 \text{ }\mu\text{m}$



Die in der Tabelle 14 gezeigten Ablationsresultate wurden mit einer Fluenz von $1,6 \text{ J/cm}^2$, einer Pulsdauer von 200 fs und einem Linienabstand von $200 \text{ }\mu\text{m}$ erzeugt. Wie in der Tabelle 14 zu sehen, konnte ab 200 kHz auch bei einem Pulsabstand von $4 \text{ }\mu\text{m}$ bei einer Fluenz von $1,6 \text{ J/cm}^2$ das Substrat erreicht werden. Wird die Frequenz weiter bei gleicher Fluenz erhöht wird der bis aufs Substrat abgetragene Bereich größer. Es blieb bei den Pulsabständen $2 \text{ }\mu\text{m}$ und $4 \text{ }\mu\text{m}$ bis 500 kHz wiedererstartete Schmelze im Zentrum der Spur zurück wie in der Tabelle 14 im Bild a) zu sehen. Bei einer Frequenz von 1 MHz bildeten sich große Schmelzkugeln auf dem Substrat nahe am inneren Rand der Spur. Kleinere Schmelzkugeln bleiben im Zentrum der Spur in sehr unregelmäßigen Abständen bei ei-

nem Pulsabstand von 4 μm zurück wie im Bild b) der Tabelle 14 gezeigt. Ab einer Frequenz von 500 kHz trat schon eine Bildung von noch sehr kleinen Schmelzkugeln im Zentrum der Spur ein. Die Spurbreite in Abhängigkeit von der Fluenz bei verschiedenen Frequenzen mit einem Pulsabstand von 4 μm sind in der Abbildung 34 gezeigt.

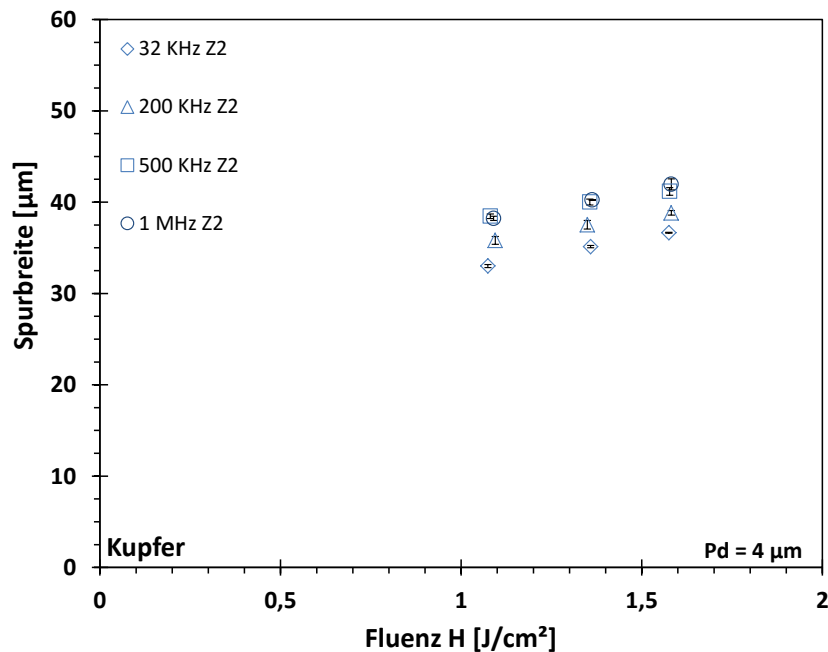


Abbildung 34: Spurbreite der Zone 2 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Frequenz, Pulsabstand 4 μm , Linienabstand 200 μm , Pulsdauer 200 fs

In der Abbildung 34 kann man sehen, dass die Breite des Linienabtrags gemäß der Zone 2 bei höheren Frequenzen größer wird. Eine wesentliche Vergrößerung der Spurbreite trat bis zu einer Frequenz von 500 kHz auf. Dies kann wieder auf die große Wärmeleitfähigkeit und der relativ großen Schichtdicke zurückgeführt werden. Die Spurbreiten bei einer Frequenz von 500 kHz und 1 MHz sind 5 μm größer als bei 32 kHz bei gleicher Fluenz. Das Substrat wurde bei keiner Frequenz bei einem Pulsabstand von 4 μm beschädigt. Die Abbildung 35 zeigt die Spurbreiten der Zone 2 und 3 mit einem Pulsabstand von 2 μm in Abhängigkeit von der Fluenz bei verschiedenen Frequenzen. Es ist in Abbildung 35 ähnlich wie bei 4 μm Pulsabstand zu erkennen, dass eine deutlich sichtbare Steigerung der Spurbreiten der Zone 2 bis zu einer Frequenz von 500 kHz auftritt. Die Breite des Linienabtrags der Zone 2 sind bei einer Frequenz von 1 MHz 6 μm größer als mit 32 kHz bei gleicher Fluenz. Ab 2 μm Pulsabstand, einer Fluenz von 1,6 J/cm^2 und einer Frequenz von 1 MHz konnte ein Linienabtrag der Zone 3 erzielt werden. Das Substrat blieb dabei unbeschädigt wie in der Tabelle 14 im Bild c) zu sehen.

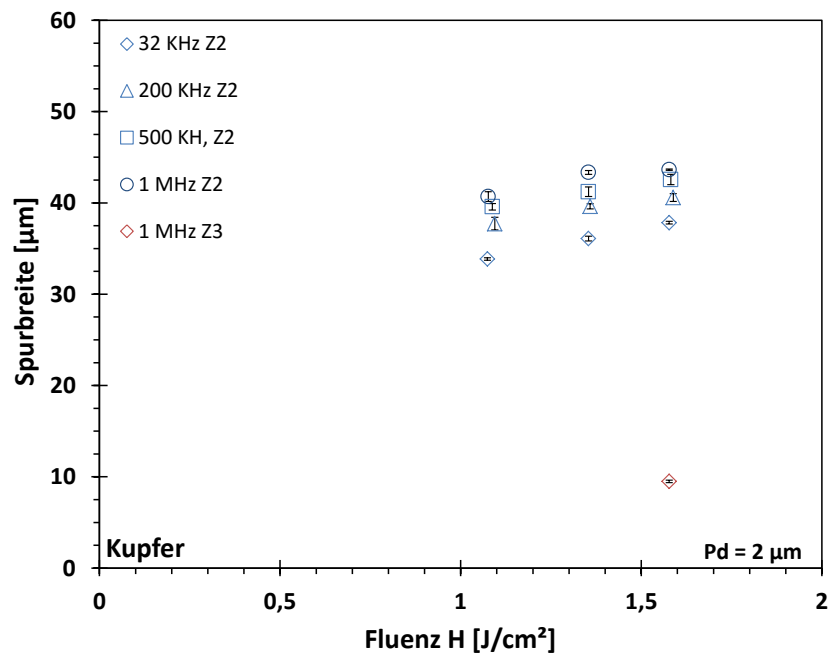


Abbildung 35: Spurbreite der Zone 2 und 3 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Frequenz, Pulsabstand 2 μm , Linienabstand 200 μm , Pulsdauer 200 fs

Verringert man den Pulsabstand auf 1 μm konnte ein Linienabtrag der Zone 3 ab einer Frequenz von 500 kHz und einer Fluenz von 1,6 J/cm² erzielt werden. Allerdings wurde dabei das Substrat beschädigt, wie in der Tabelle 14 im Bild d) zusehen. Dies geschah auch bei kleineren Fluenzen wenn Linienabtrag gemäß der Zone 3 erreicht wurde, da wie im Bild e) der Tabelle 14 zu sehen das Substrat schon vorher beschädigt wurde. Wie in der Abbildung 36 zu sehen, wächst die Spurbreite der Zone 2 nun auch noch bei 1 MHz deutlich an. Die Spurbreiten der Zone 2 sind mit 1 MHz um 8 μm größer als mit einer Frequenz von 32 kHz bei gleicher Fluenz. Auch ist zu sehen, dass die Breite der Zone 2 viermal so groß ist wie die der Zone 3. Der Grund sind die Schmelzreste vom innere Rand der Spur, dessen spitzen noch weit bis ins Innere der Spur reichen können. Auch vereinzelte sehr kleine Schmelztropfen die sich noch auf der Spur befanden bewirken dieses im Vergleich zu den anderen Schichtmetallen, für die Strukturierung, ungünstige Verhältnis der beiden Zonen.

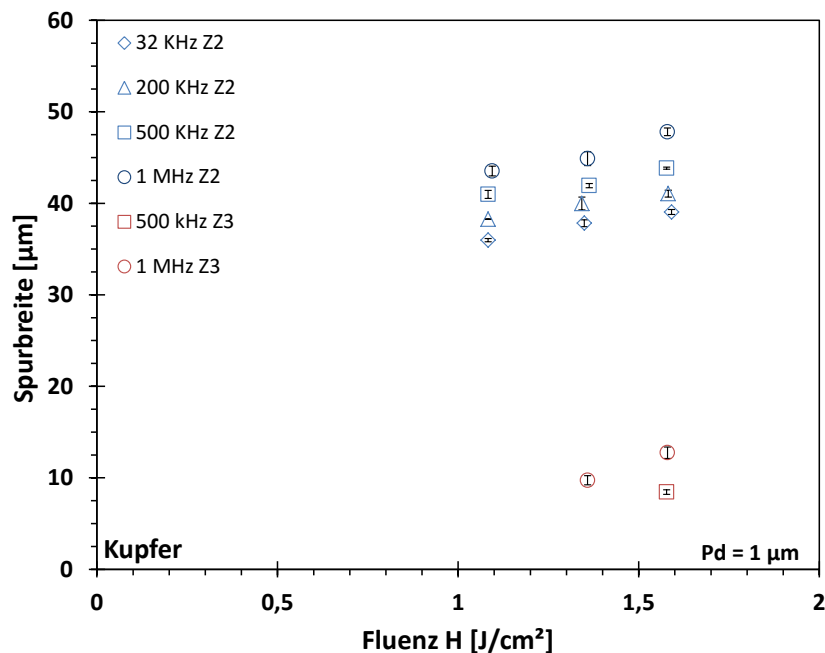
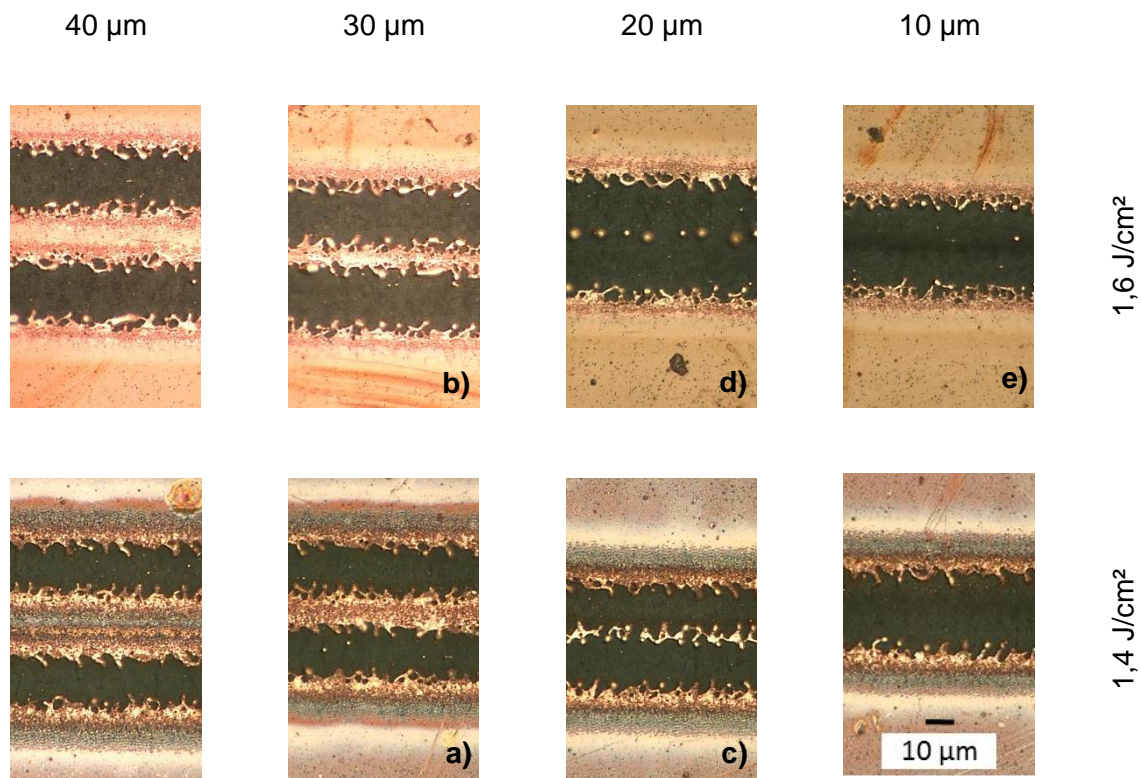


Abbildung 36: Spurbreite der Zone 2 und 3 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Frequenz, Pulsabstand 1 μm , Linienabstand 200 μm , Pulsdauer 200 fs

5.3.3 Variation des Linienabstandes

In diesem Kapitel wird der Einfluss des Linienabstandes auf das ablatieren einer dünnen Kupferschicht untersucht. Aus den Kapiteln 5.3.1 geht hervor, dass bei einer Frequenz von 32 kHz kein Linienabtrag gemäß der Zone 3 realisiert werden kann. Im Kapitel 5.3.2 wurde gezeigt, dass bei einem Pulsabstand von 2 μm und einer Frequenz von 1 MHz sowie einer Fluenz von 1,6 J/cm² ein Linienabtrag der Zone 3 erreicht werden konnte. Auch mit einem Pulsabstand von 1 μm konnte bereits mit einer Frequenz von 500 kHz bei gleicher Fluenz einen Linienabtrag der Zone 3 erreicht werden. Allerdings wurde das Substrat dabei stets beschädigt weshalb sich dieser Pulsabstand nicht eignet um die Kupferschicht zu ablatieren. Daraus lässt sich schließen, dass nur ein Parametersatz von 2 μm Pulsabstand, einer Frequenz 1 MHz und einer Fluenz von 1,6 J/cm² sich zum Abtragen der Kupferschicht eignet. Für den Fall das es durch das ablatieren der ersten Linien zu Wärmeakkumulation kommt die ein verbesserten Abtrag der 2. Linien zur Folge hätte wurden die Untersuchungen mit dem genannten Parametersatz auch mit einer Fluenz von 1,4 J/cm² durchgeführt. Die Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Linienabständen in Abhängigkeit von der Fluenz sind in der Tabelle 15 gezeigt. Vergleicht man die Bilder a) und b) der Tabelle 15 ist zu sehen, dass der Steg zwischen den ablatierten Linien mit steigender Fluenz aber gleichem Linienabstand kleiner wird, da die Einzellinien breiter werden.

Tabelle 15: Übersicht der Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Linienabständen in Abhängigkeit der Fluenz bei einem Pulsabstand 2 μm und einer Frequenz von 1 MHz



Ebenfalls wird der Steg mit sinkendem Linienabstand bei gleicher Fluenz schmaler da die beiden Linien näher zusammen sind, wie der Vergleich zwischen den Bildern a) und c) zeigt. Die Einzellinien blieben bei allen Linienabständen stets gleich breit, was zeigt das es zwischen den beiden abgetragenen Linien nicht zu einer Wärmeakkumulation kommt die dazu führen würde das die Linien nicht gleich breit wären. Bei einer Fluenz von 1,4 J/cm² blieben gelegentlich kleine Schmelzkugeln innerhalb beider Spuren, wie im Bild a) zusehen, zurück. Durch die Schmelze kam es auch zu einem Aufwurf im Randbereich des Linienabtrags der bis zu 3 μm hoch wurde. Der kleinste Steg mit einer Breite von 10 μm konnte mit einem Linienabstand von 32 μm und einer Fluenz von 1,6 J/cm² erzeugt werden. Verringert man den Linienabstand wird der Steg komplett geschmolzen aber nur wenig verdampft weshalb er wie im Bild c) zusehen in Einzelne Teilstücke zerfällt. Sinkt der Linienabstand weiter werden die Teilstücke kleiner bis nur noch wie im Bild d) zu sehen Schmelzkugeln auf einer Linie zwischen den ablatierten Linien zurück bleibt. Ab einem Linienabstand von 10 μm kam es zu einem sauberen flächigen Abtrag, wie im Bild e) der Tabelle 15 zusehen. Die Abtragsrate beträgt dabei 10 mm²/s.

5.4 Titan

5.4.1 Variation des Pulsabstandes

In diesem Kapitel wird der Einfluss des Pulsabstands auf das Abtragen einer dünnen Titanschicht untersucht. Dazu wurden zuerst die möglichen Spurbreiten berechnet die in Abhängigkeit von der Fluenz in der Abbildung 37 gezeigt sind. Zur Berechnung der Spurbreiten wurde die Formel (4) und die Schwellfluenzen der Zone 2 und 3 für Einzelpulse verwendet. In der Abbildung ist zu sehen, dass die Spurbreite der Zone 2 von 30 μm auf 37 μm ansteigt wenn man die Fluenz von 0,4 J/cm^2 auf 1 J/cm^2 erhöht. Die Spurbreite der Zone 3 vergrößert sich von 24 μm auf 32 μm im selben Fluenzbereich.

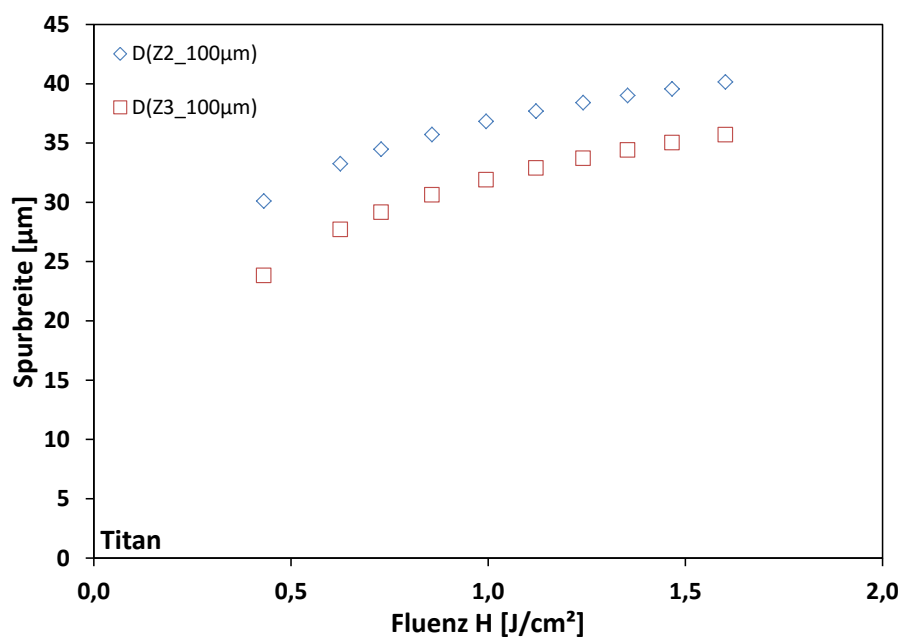
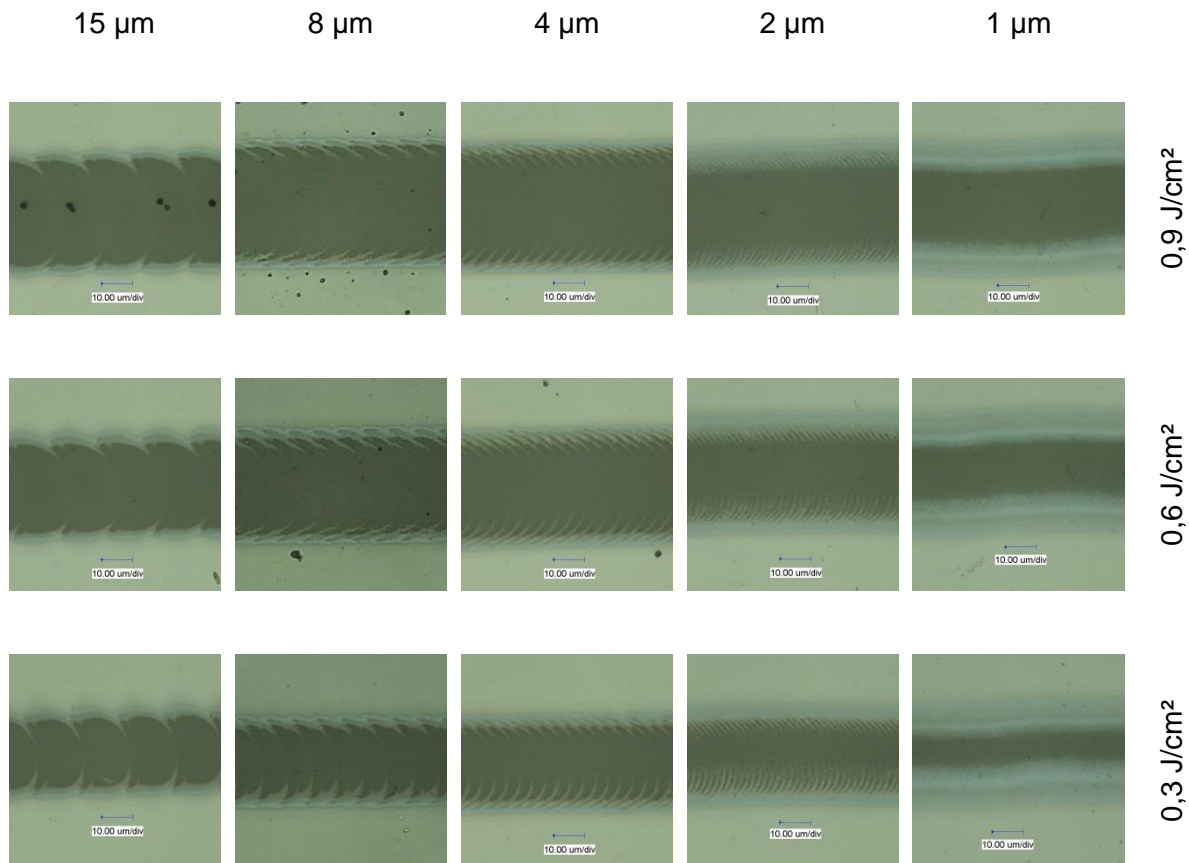


Abbildung 37: Abschätzung der möglichen Spurbreiten der Zonen 2 und 3 in Abhängigkeit von der Fluenz mittels der Formel (4) und den Schwellfluenzen für Einzelpulse von Titan

Titan besitzt von den untersuchten Schichtmetallen mit 22 nm die kleinste Schichtdicke. Der Reflexionsgrad ist ebenfalls mit 55 im Geringsten. Die optische Eindringtiefe ist deshalb größer als die Schichtdicke, weshalb die absorbierte Leistung bei dieser Schicht um den transmittierten Anteil verringert wird. Die Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Pulsabständen in Abhängigkeit der Fluenz sind in der Tabelle 16 dargestellt. In dieser kann man erkennen, dass ab einem Pulsabstand von 15 μm und einer Fluenz über 0,3 J/cm^2 eine linienhafte Bearbeitung der Zone 3 realisiert werden konnte. Dabei ragen die unterbrochenen Stege quer zur Bearbeitungsrichtung noch weit in das Zentrum der Spur hinein. Verringert man den Pulsabstand weiter so rücken auch die Zacken vom Rand näher zusammen. Dabei entspricht der Abstand der Zacken dem Pulsabstand. Ab einem Pulsabstand von 1 μm sind keine einzelnen Zacken mehr erkennbar.

Tabelle 16: Übersicht der Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Pulsabständen in Abhängigkeit der Fluenz bei einer Pulsfrequenz von 32 kHz und einem Linienabstand von 200 µm



In der Abbildung 38 ist die Spurbreite in Abhängigkeit der dafür verwendeten Fluenz für verschiedene Pulsabstände aufgetragen. Aus dieser ist erkennbar, dass die Spurbreite der Zone 2 bei steigender Fluenz, aber auch bei sinkendem Pulsabstand an wächst. Dies kann zum Großteil auf den größer werdenden vorgeschädigte Bereich zurückgeführt werden. Allerdings ist auch in der Abbildung 38 erkennbar, dass bei der größten Fluenz ein kleinerer unterschied in der Spurbreite zwischen 1 µm und 15 µm entsteht als bei kleineren Fluenzen. Dies kann darauf zurückgeführt werden das bei höheren Fluenzen weniger durch den Vorgängerpuls an vorgeschädigten Material zurück bleibt, welches aber für das Eintreten von Inkubationseffekten notwendig ist. In der Übersicht ist auch zu erkennen, dass die Zone 3 durch das steigern der Fluenz schneller nach außen anwächst als die Zone 2. Die Spurbreite der Zone 2, bei einem Pulsabstand von 1 µm, wächst von 0,3 J/cm² bis 0,9 J/cm² nach außen um 10 µm an während die Zone 3, wie in der Abbildung 39 gezeigt, um 14 µm anwächst.

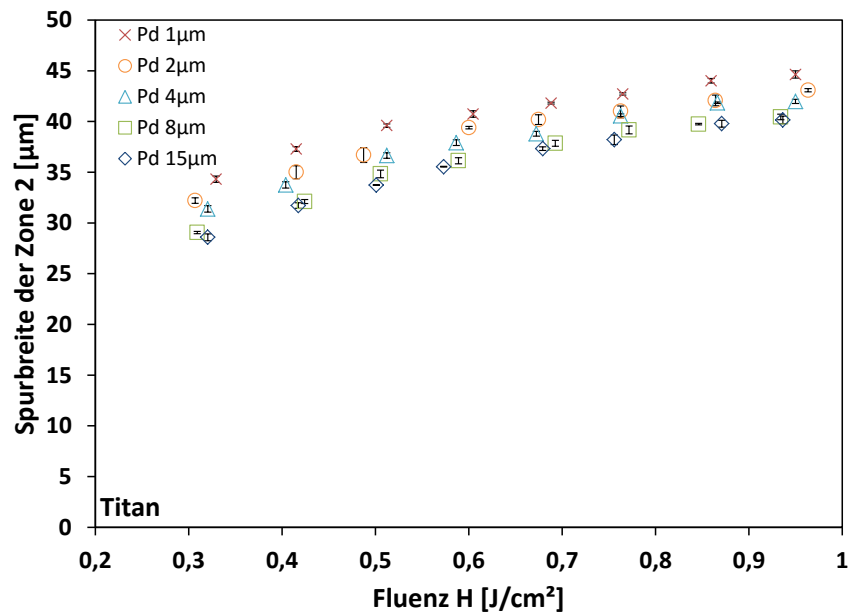


Abbildung 38: Spurbreite der Zone 2 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Pulsabständen, Frequenz 32 kHz, Linienabstand 200 µm, Pulsdauer 200 fs

Wie aus der Tabelle 16 zu erkennen ist, wächst die Zone 2 bei kleiner werdenden Pulsabstand nicht nur nach außen an sondern ab einem Pulsabstand von 8 µm wird sie auch wieder zum Zentrum der Spur hin wieder Größer. Durch das Vermessen der Breite der linienhaften Bearbeitung der Zone 3 konnte die Abbildung 39 erstellt werden. In dieser sind die Spurbreiten der Zone 3 in Abhängigkeit der dafür verwendeten Fluenz für verschiedene Pulsabstände aufgetragen. Vergleicht man die Abbildung 38 mit der Abbildung 39 wird das schnellere anwachsen der Zone 3 gegenüber der Zone 2 nochmal sehr deutlich. In der Abbildung 39 ist zu sehen das die Spurbreite beim verringern des Pulsabstandes von 15 µm auf 8 µm größer wird. Die Änderung der Spurbreite durch das verringern des Pulsabstandes wird allerdings kleiner bei steigender Fluenz. Bei kleineren Pulsabständen als 8 µm wird die Breite der linienhaften Bearbeitung der Zone 3 bei gleicher Fluenz wieder kleiner. In der Abbildung 39 kann man sehen, dass ab einer Fluenz von 0,5 J/cm² und einem Pulsabstand von 4 µm, nahezu die gleiche Spurbreite der Zone 3 erzielt werden konnte wie bei einem Pulsabstand von 15 µm.

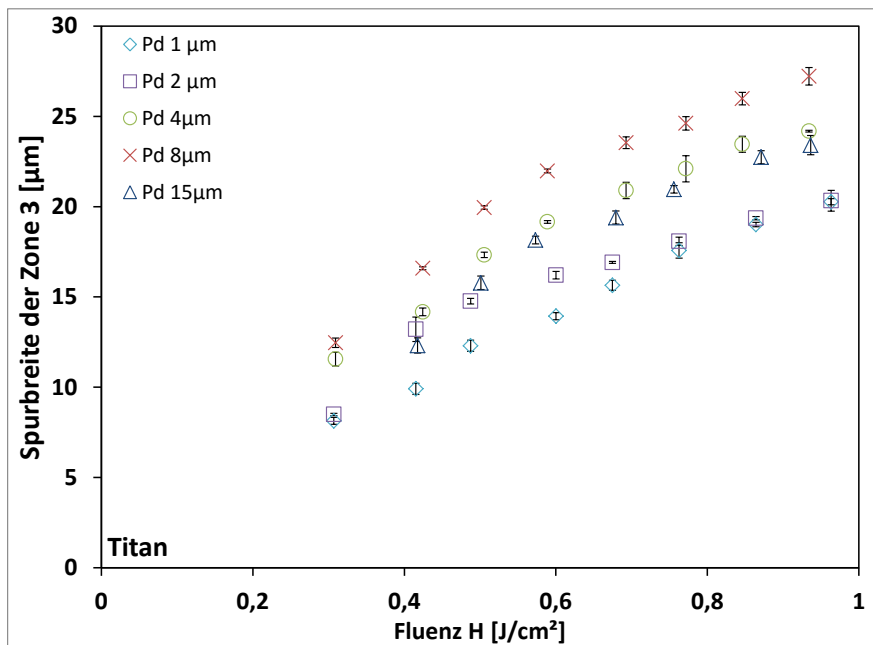


Abbildung 39: Spurbreite der Zone 3 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Pulsabständen, Frequenz 32 kHz, Linienabstand 200 μm, Pulsdauer 200 fs

5.4.2 Variation der Frequenz

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Frequenz auf das Abtragen einer dünnen Titanschicht untersucht.

Tabelle 17 Übersicht der Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Frequenzen in Abhängigkeit des Pulsabstandes bei einer Fluenz von 0,9 J/cm², einer Pulsdauer von 200 fs

32 kHz	200 kHz	500 kHz	1000 kHz	
				Pulsabstand 4 μm
				Pulsabstand 1 μm

In der Tabelle 16 sind die Bearbeitungsergebnisse mit verschiedenen Frequenzen in Abhängigkeit des Pulsabstandes bei einer Fluenz von $0,9 \text{ J/cm}^2$ gezeigt. In der Tabelle 17 ist zu sehen, dass bei einem Pulsabstand von $4 \text{ }\mu\text{m}$ wieder erstarrte Schmelze in einem Sägezahnmuster am Rand zurück bleibt. Der Abstand der Zähne entspricht dem Pulsabstand. Dieses Sägezahnmuster, das sich schon Kapitel 5.4.1 bei 32 kHz zeigte, entsteht wie in der Tabelle zu sehen auch mit höheren Pulswiederholraten. Mit einem Pulsabstand von $1 \text{ }\mu\text{m}$ kommt es nicht mehr zu einer Ausbildung eines solchen Musters da die einzelnen Zähne sich größtenteils überlappen. Dieses Bearbeitungsergebnis im Randbereich bleibt tritt bei allen untersuchten Frequenzen auf. Mit höheren Frequenzen als 32 kHz wird die Zone 3 größer aber die Zone 2 ändert ihre Größe nicht. Ein Aufwurf im Randbereich konnte bei beiden Pulsabständen nicht festgestellt werden. Die Abbildung 40 zeigt die Spurbreiten mit einem Pulsabstand von $4 \text{ }\mu\text{m}$ in Abhängigkeit von der Fluenz bei verschiedenen Pulswiederholraten für die Zonen 2 und 3. In der Abbildung ist zu erkennen, dass sich die verschiedenen Frequenzen nicht auf die Breite des Linienabtrags beider Zonen auswirken. Dies kann zum einen mit der sehr kleinen Wärmeleitfähigkeit von Titan erklärt werden, was zu einem geringen Transport von Wärme in umliegendes Schichtmaterial führt. Außerdem ist der Wärmetransport durch die sehr kleine Schichtdicke von $0,02 \text{ }\mu\text{m}$ eingeschränkt da nur sehr wenig angrenzendes Schichtmaterial für den Wärmetransport durch Wärmeleitung zur Verfügung steht.

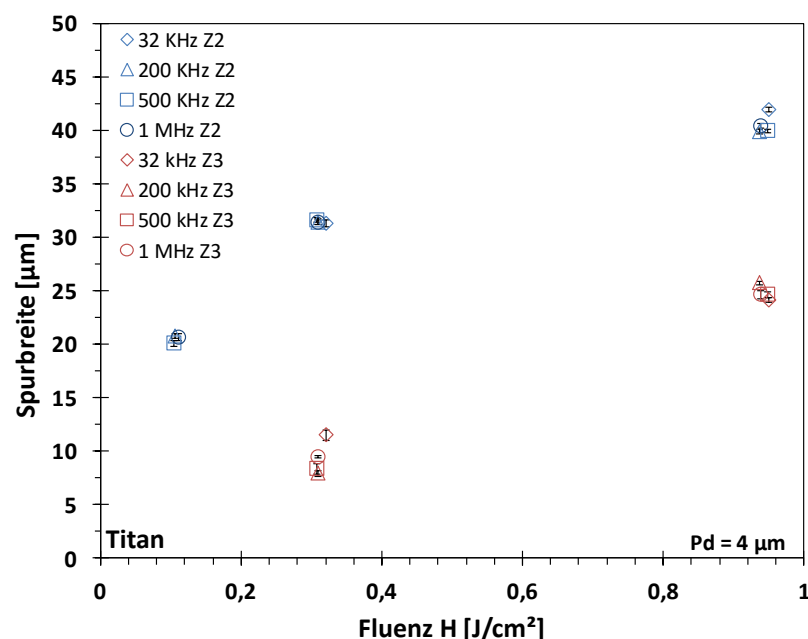


Abbildung 40: Spurbreite der Zone 2 und 3 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Frequenz, Pulsabstand $4 \text{ }\mu\text{m}$, Linienabstand $200 \text{ }\mu\text{m}$, Pulsdauer 200 fs

Die Spurbreiten der Zone 2 nimmt von $21 \text{ }\mu\text{m}$ auf $41 \text{ }\mu\text{m}$ zu durch das Steigern der Fluenz von $0,1 \text{ J/cm}^2$ auf $0,9 \text{ J/cm}^2$. Ein Linienabtrag gemäß der Zone 3 konnte erst ab einer Fluenz von $0,3 \text{ J/cm}^2$ mit einer Breite von $10 \text{ }\mu\text{m}$ erzielt werden. Durch das Erhöhen der

Fluenz auf $0,9 \text{ J/cm}^2$ vergrößert sich die Spurbreite auf $25 \text{ }\mu\text{m}$. Die Spurbreiten der Zonen 2 und 3 sind in Abhängigkeit der Fluenz mit verschiedenen Pulswiederholraten bei einem Pulsabstand von $1 \text{ }\mu\text{m}$ sind in der Abbildung 41 gezeigt. In der Abbildung ist zu erkennen, dass sich auch mit $1 \text{ }\mu\text{m}$ Pulsabstand sich die Breite des Linienabtrags gemäß Zone 2 nicht aufgrund der verschiedenen Frequenzen ändert, sondern nur aufgrund der Fluenz. Die Spurbreite der Zone 2 beträgt bei einer Fluenz von $0,3 \text{ J/cm}^2$ $34 \text{ }\mu\text{m}$ und vergrößert sich auf $42 \text{ }\mu\text{m}$ durch das Steigern der Fluenz auf $0,9 \text{ J/cm}^2$. Dies kann wieder mit der geringen Wärmeleitfähigkeit und der sehr kleinen Dicke der Titanschicht erklärt werden. Die Spurbreite der Zone 3 bleibt wie die Zone 2 gleich bei allen Frequenzen und beträgt $9 \text{ }\mu\text{m}$ bei einer Fluenz von $0,3 \text{ J/cm}^2$. Bei einer Fluenz von $0,9 \text{ J/cm}^2$ wird ein Linienabtrag gemäß der Zone 3 mit einer Spurbreite von $20 \text{ }\mu\text{m}$ bei 32 kHz erzeugt, die um $4 \text{ }\mu\text{m}$ kleiner als bei den anderen Frequenzen ist.

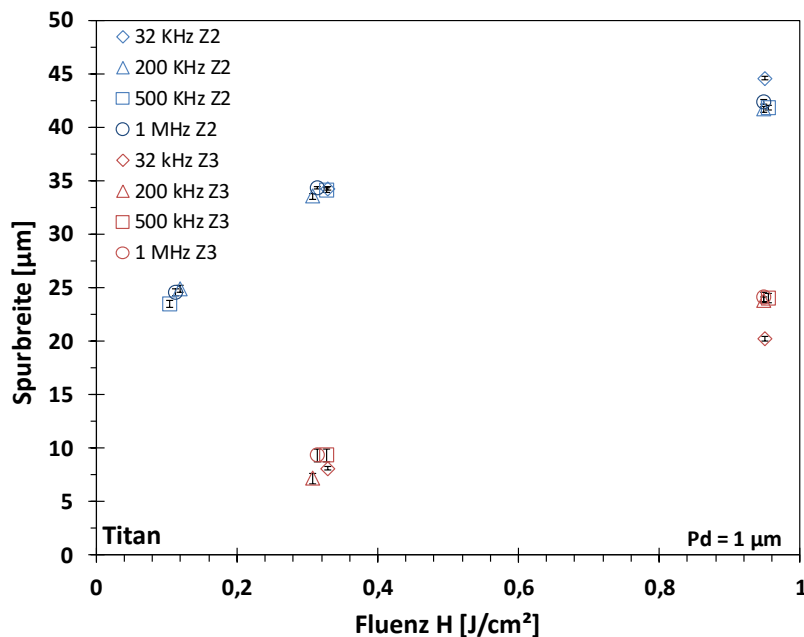


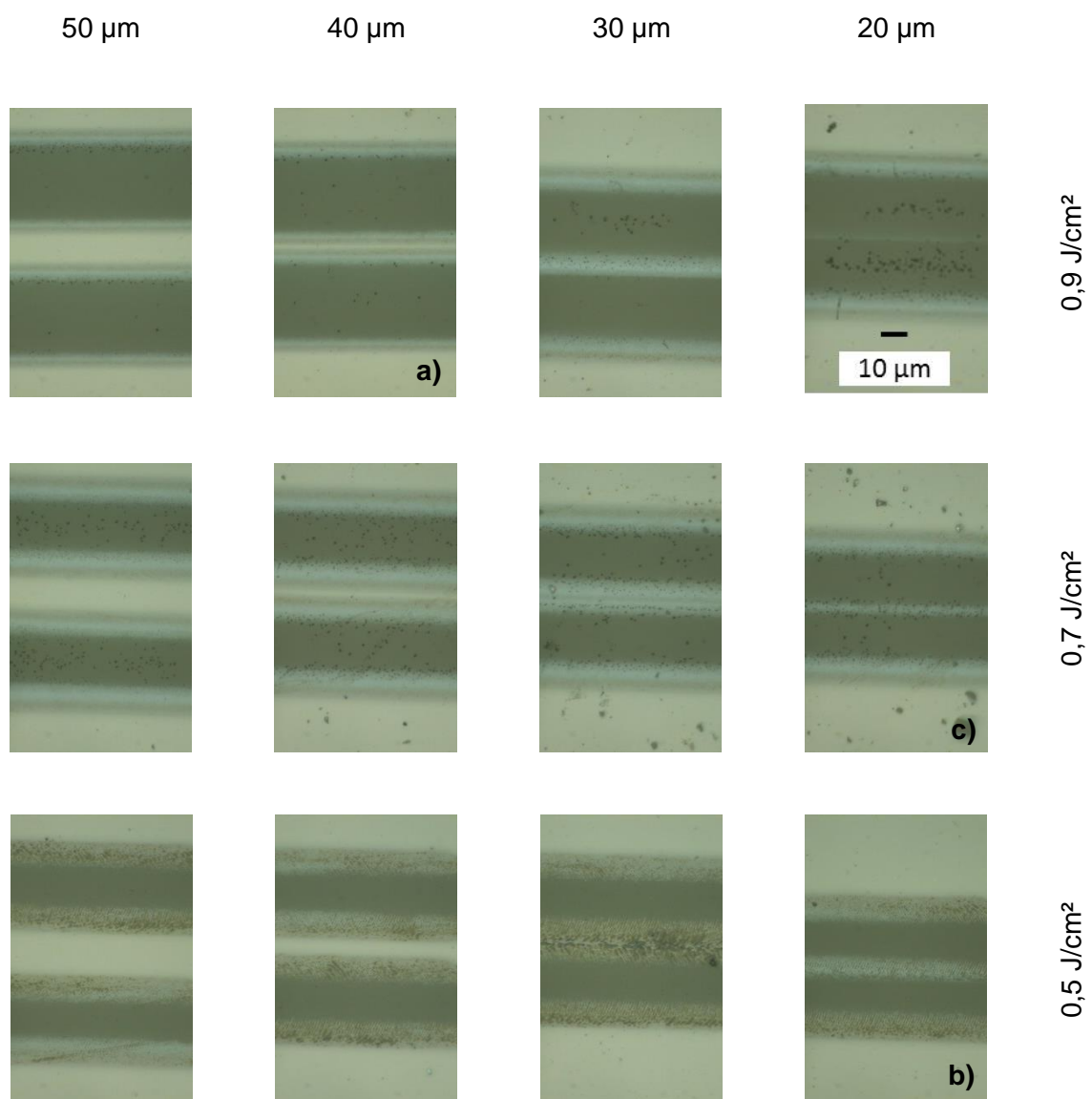
Abbildung 41: Spurbreite der Zone 2 und 3 in Abhängigkeit der Fluenzen bei verschiedenen Frequenz, Pulsabstand $1 \text{ }\mu\text{m}$, Linienabstand $200 \text{ }\mu\text{m}$, Pulsdauer 200 fs

5.4.3 Variation des Linienabstandes

In diesem Kapitel wird der Einfluss des Linienabstands sowie möglich Parametersätze zur Schrapp- und Feinbearbeitung untersucht. Aus dem Kapitel 5.4.1 kann entnommen werden, dass die kleinste Spurbreite der Zone 3 mit einem Pulsabstand von $1 \text{ }\mu\text{m}$ erzielt werden kann. Ebenfalls weist die Zone 2 bei diesem Pulsabstand kein Sägezahnmuster auf sondern besteht außer sehr nahe der Zone 3 aus noch einem zusammenhängenden Schichtmaterial. Dies ermöglicht es Stege zu erzeugen die aus einem Schichtmaterial bestehen gemäß der Zone 2. Mit einem Pulsabstand von $8 \text{ }\mu\text{m}$ konnten die Breitesten Spuren der Zone 3 erzeugt werden. Ebenfalls wurde gezeigt, dass der Unterschied zwi-

schen der Spurbreite der Zone 2 und 3 bei hohen Fluenz geringer ist als bei kleinen Fluenzen. Im Kapitel 5.4.2 wurde gezeigt, dass sich die Spurbreiten aufgrund der Puls-
wiederholfrequenz in einem Bereich von 32 kHz bis 1 MHz nicht ändern sondern nur auf-
grund der Fluenz. Daraus ergibt sich für einen möglichen Feinbearbeitungsparametersatz
mit einem Pulsabstand von 1 μm und einer Frequenz von 1 MHz. Die Bearbeitungsergeb-
nisse sind bei diesem Parameter sind in der Tabelle 18 bei verschiedenen Linienabstan-
den in Abhängigkeit von der Fluenz gezeigt. Die ablatierten Linien wurden unidirektional
erzeugt.

**Tabelle 18 Übersicht der Bearbeitungsergebnisse bei verschiedenen Linienabständen in
Abhängigkeit der Fluenz bei einem Pulsabstand 1 μm und einer Frequenz von 1 MHz**



In der Tabelle 18 ist zu sehen, dass der Steg zwischen den ablatierten Linien mit sinken-
dem Linienabstand und gleich bleibender Fluenz schmaler wird, da die beiden Einzellinien

näher zusammen sind. Die Stegbreite verringert sich dabei entsprechend dem Linienabstand. Ebenfalls sinkt die Breite des Steges mit steigender Fluenz und gleich bleibendem Linienabstand da die Einzellinien Breiter werden, wie in der Tabelle 18 zu sehen. In der Tabelle ist auch wieder zu sehen, dass die Breite der Zone 3 bei steigender Fluenz schneller zunimmt als die Breite der Zone 2. Der kleinste Steg mit noch unbearbeitetem Schichtmaterial im Zentrum wurde bei einem Linienabstand von 40 μm , einer Fluenz von 0,9 J/cm^2 mit einer Breite von 13 μm erzeugt und ist im Bild a) der Tabelle 17 zu sehen. Der Grund dafür ist die relativ kleine Zone 2 bei dieser hohen Fluenz im Gegensatz zu kleiner Fluenzen. Mit höheren Fluenzen oder kleineren Linienabstand beginnen sich die Zonen 2 der einzelnen Linien zu überlappen. Der kleinste noch zusammenhängende Steg bei dem sich die Zonen 2 der Einzellinien überlappen wurde mit einer Fluenz von 0,5 J/cm^2 sowie einem Linienabstand von 20 μm erzeugt mit einer Breite von 10 μm und ist im Bild b) der Tabelle 17 gezeigt. Dadurch kann die Auflösung von Strukturen um 50 % erhöht werden. Beide Parametersätze können je nach Anforderungen an den Steg als Feinbearbeitungsparametersatz genutzt werden. Mit höheren Fluenz und gleichem Linienabstand wird der Steg immer kleiner und ist in unregelmäßigen Abständen unterbrochen wie im Bild c) der Tabelle 17 zu sehen, bis sich die Zone 3 der einzelnen Linien überlappen und kein Schichtmaterial als Steg zwischen ihnen mehr zurück bleibt. Ein flächiger Abtrag konnte bei einem Pulsabstand von 1 μm , einer Frequenz von 1 MHz, einer Fluenz von 0,9 J/cm^2 und mit einem Linienabstand kleiner als 20 μm erreicht werden. Mit einem Pulsabstand von 8 μm konnte bei gleicher Fluenz und einer Frequenz von 500 kHz bereits ein flächiger Abtrag mit einem Linienabstand von 27 μm erzielt werden wie in Abbildung 42 zu sehen, da die Zone 3 bei diesem Pulsabstand am größten ist wie im Kapitel 5.4.1 gezeigt wurde. Ebenfalls konnte im Kapitel 5.4.2 nachgewiesen werden das die Frequenz im Bereich von 32 kHz bis 1 MHz keinen Einfluss auf die Spurbreite hat. Auch wird mit diesem Parametersatz die maximale Scangeschwindigkeit ausgenutzt, weshalb er als idealer Schruppbearbeitungsparameter angesehen werden kann mit dem eine Flächenabtragsrate ohne Verzögerungszeiten von 108 mm^2/s erreicht werden kann.



Abbildung 42: flächiger Abtrag von Titan mit einem Pulsabstand von 8 μm und einer Fluenz von 0,9 J/cm^2

6 Zusammenfassung

Durch die Entwicklung von hochrepetierenden Ultrakurzpulslasern eröffnen sich für die Lasermaterialbearbeitung neue Möglichkeiten. Aufgrund ihrer geringen thermischen Eindringtiefe und ihrer hohen Pulswiederholfrequenz eignen sie sich vor allen zum Strukturieren dünner Schichten. Dafür sind allerdings Kenntnisse über den Einfluss von verschiedenen Parametern auf das Ablationsverhalten notwendig, um entsprechende Bearbeitungsergebnisse zu erzielen. Die Auswirkungen von unterschiedlichen Parametern wurden auf die Schichtmetalle Chrom, Aluminium, Kupfer und Titan untersucht. Die größte Schichtdicke besitzt Kupfer mit $0,5\text{ }\mu\text{m}$ und Titan die kleinste mit $0,02\text{ }\mu\text{m}$. Die Schichtdicke von Chrom beträgt $0,16\text{ }\mu\text{m}$ und die von Aluminium $0,23\text{ }\mu\text{m}$. Die Untersuchungen wurden mit einer Pulsdauer von 200 fs , bei einer Wellenlänge von 1030 nm , einer Pulswiederholfrequenz von 32 kHz und mit einem Fokusedurchmesser von $16,4\text{ }\mu\text{m}$ durchgeführt. Um einen Linienabtrag ohne Rückstände der Metallschicht zu erzeugen ist ein überlappendes Bearbeiten durch Einzelpulse notwendig. Deshalb wurde zunächst der Einfluss des Pulsabstandes auf das Ablationsverhalten der vier Schichtmaterialien untersucht. Der Pulsabstand wurde in einem Bereich von $15\text{ }\mu\text{m}$ bis $1\text{ }\mu\text{m}$ variiert und eine Frequenz von 32 kHz genutzt. Es konnte festgestellt werden dass sich die Spurbreiten fast immer, durch das Verringern des Pulsabstandes, vergrößern, was auf Inkubations- und Akkumulationseffekte zurückgeführt werden kann. Die Ausnahmen sind die Zone 1 von Chrom, die bei sinkendem Pulsabstand bei gleicher Fluenz konstant blieb und die Zone 3 von Titan, die ab einem Pulsabstand von $8\text{ }\mu\text{m}$ wieder kleiner wurde. Auch wurde gezeigt, dass die verschiedenen Zonen durch das Steigern der Fluenz unterschiedlich schnell größer werden. Im Vergleich zwischen den Metallschichten bei gleichem Pulsabstand und Fluenz ist die Zunahme der Spurbreite aufgrund eines schrumpfenden Pulsabstandes bei Chrom am größten mit $10\text{ }\mu\text{m}$ und bei Kupfer mit $4\text{ }\mu\text{m}$ am kleinsten. Die geringe Veränderung der Spurbreite bei Kupfer kann mit der relativ großen Schichtdicke erklärt werden. Deshalb konnte bei Kupfer auch mit keinem Pulsabstand ein sauberer Linienabtrag bis auf das Substrat erzielt werden. Um dies zu erreichen wurde anschließend die Pulswiederholfrequenz in einem Bereich von 32 kHz bis 1 MHz variiert. Ebenfalls kann dadurch die Geschwindigkeit, mit der die Metallschichten abgetragen werden, erhöht und bei manchen auch die Spurbreite vergrößert werden. Eine deutliche Veränderung der Spurbreite konnte bei Aluminium und Kupfer aufgrund einer erhöhten Frequenz festgestellt werden. Die Spurbreiten wurden dabei je nach Pulsabstand bis zu $7\text{ }\mu\text{m}$ bei Kupfer und $5\text{ }\mu\text{m}$ bei Aluminium größer. Chrom und Titan zeigten keine Änderung der Spurbreiten bei der Variati-

on der Frequenz. Dies kann damit erklärt werden das Aluminium und Kupfer die Schichtmaterialien mit der größten Schichtdicke und Wärmeleitfähigkeit sind. Auch konnte durch das Erhöhen der Frequenz ein sauberer Linienabtrag bis auf das Substrat bei allen Schichtmaterialien mit kleineren Fluenzen und größeren Pulsabständen erzeugt werden. Mit geeigneten Parametern wurde anschließend der Einfluss des Linienabstandes untersucht. Es konnte dabei festgestellt werden, dass der Linienabstand keine Auswirkungen auf die Spurbreite der Einzellinien bei allen Schichtmaterialien hat. Der größte flächige Abtrag konnte bei Titan erzielt werden mit einer Flächenabtragsrate von $108 \text{ mm}^2/\text{s}$. Ebenfalls wurde auf der Chromschicht eine Beispielstruktur in Mäanderform erzeugt um weitere Optimierungsmöglichkeiten bei der Bearbeitung von dünnen Schichten mittels Laserstrahlung aufzuzeigen.

Literaturverzeichnis

- [1] B. Schöps, „Untersuchung des Abtrags dünner Metallschichten mit ultrakurzen Laserpulsen,“ Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2014.
- [2] D. Walter, „Online-Qualitätssicherung beim Bohren mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung,“ Herbert Utz Verlag GmbH, Stuttgart , 2010.
- [3] H. Michael, „Zeitaufgel Photoemissionsspektroskopie an Au-GaAs Schottky-Kontakten,“ Würzburg, 2001.
- [4] A. Gillner, „Verfahren und Systeme zur Mikro-und Nanostrukturierung mit Ultrakurzpulslasern,“ Fraunhofer-Institut für Lasertechnik Aachen, Aachen.
- [5] B. A. Bulgakova N.M., „Pulsed laser ablation of solids: transition from normal vaporization,“ Springer Verlag, Novosibirsk, Göteborg, 2000.
- [6] K. R. Miotello A., „Critical assessment of thermal models for laser sputtering at high fluences,“ Applied Physics Letters, 1995.
- [7] S. I. e. a. Anisimov, „Thresholds for front-side ablation and rear side spallation of metal foil irradiated by femtosecond laser pulse,“ Applied Physics, 2008.
- [8] I. D. S. Zhigilei Leonid V., „Channels of energy redistribution in short-pulse laser interactions with metal targets,“ Elsevier B.V., 2005.
- [9] F. ,. Z. T. Völklein, Praxiswissen Mikrosystemtechnik, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2006.
- [10] P. Olddorf, R. Peters, B. S. Marcus und J. Gisma, „Hochpräzise Mikrostrukturierung von Nanoschichten mittels ultrakurzer Laserpulse,“ Zeulenroda, 2013.

- [11] e. a. F. Pedrotti, Optik für Ingenieure, Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2008.
- [12] J. H. ,. F. H. P. R. Weaver, „OPTICAL PROPERTIES OF METALS AND SEMICONDUCTORS“.
- [13] R. Yunpeng, „Ultrashort laser pulse energy deposition in metal films with phase changes,“ 2011.
- [14] R. Bödefeld, „Alternative laseroptische Bauelemente für ultrakurze Pulse,“ Jena, 2002.
- [15] A. Böge, Vieweg Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik, Wiesbaden: Friedr. Vieweg und Sohn Verlag GWV Fachverlage GmbH, 2008.
- [16] J. M. Liu, „Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes,“ *Optics Letters*, pp. 196-198, 1982.
- [17] M. Stumpf, „Pulsformierung in modengekoppelten Faseroszillatoren,“ Institut für Angewandte Physik IAP, Jena, 2005.
- [18] S. M. W. Kneubühl Fritz Kurt, Laser, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2005.
- [19] D. Meschede, Optik, Licht und Laser, Wiesbaden: Springer Verlag, 2005.

Anlagen

Teil 1 LIU-Plots.....A-I

Anlagen, Teil 1

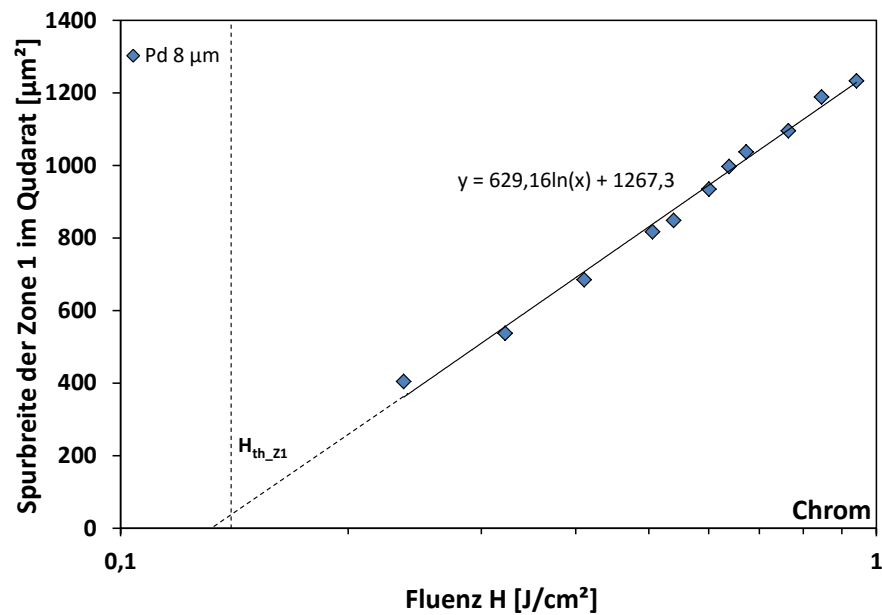


Abbildung 43 LIU-Plot für Chrom, Quadrat der Spurbreite der Zone 1 gegenüber der zugehörigen logarithmisch aufgetragenen Fluenz, gestrichelte Linie ist Schwellfluenz der Zone 1 für Einzelpulse, Frequenz 32 kHz, Linienabstand 200 μm , Pulsdauer 200 fs

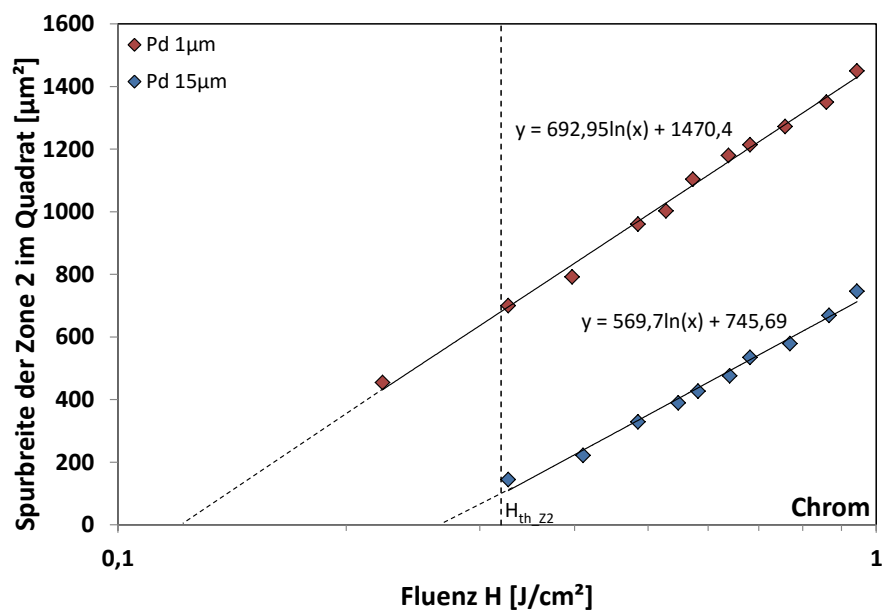


Abbildung 44 LIU-Plot für Chrom, Quadrat der Spurbreite der Zone 2 gegenüber der zugehörigen logarithmisch aufgetragenen Fluenz, gestrichelte Linie ist Schwellfluenz der Zone 2 für Einzelpulse, Frequenz 32 kHz, Linienabstand 200 μm , Pulsdauer 200 fs

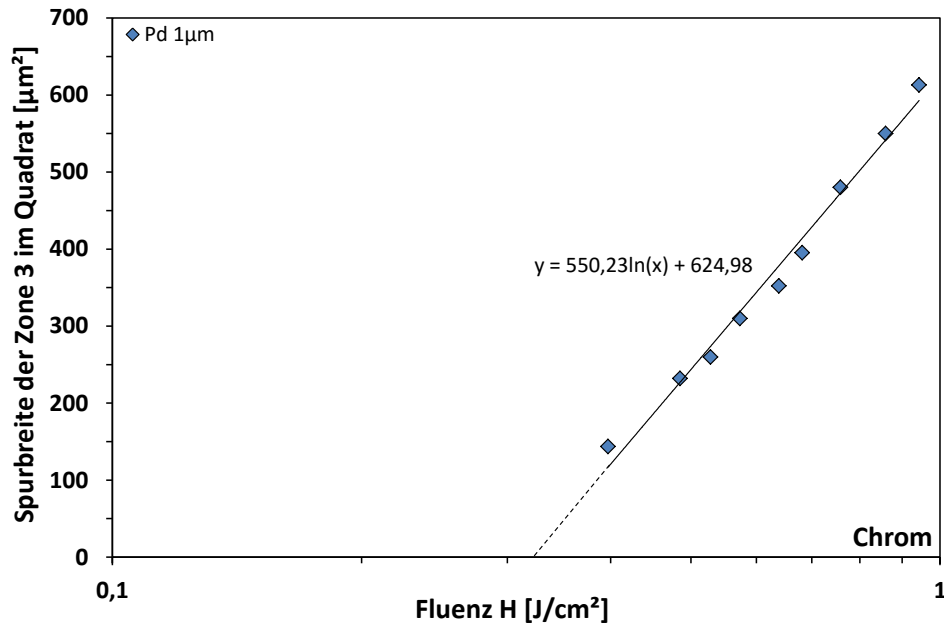


Abbildung 45 LIU-Plot für Chrom, Quadrat der Spurbreite der Zone 3 gegenüber der zugehörigen logarithmisch aufgetragenen Fluenz, Frequenz 32 kHz, Linienabstand 200 μm , Pulsdauer 200 fs

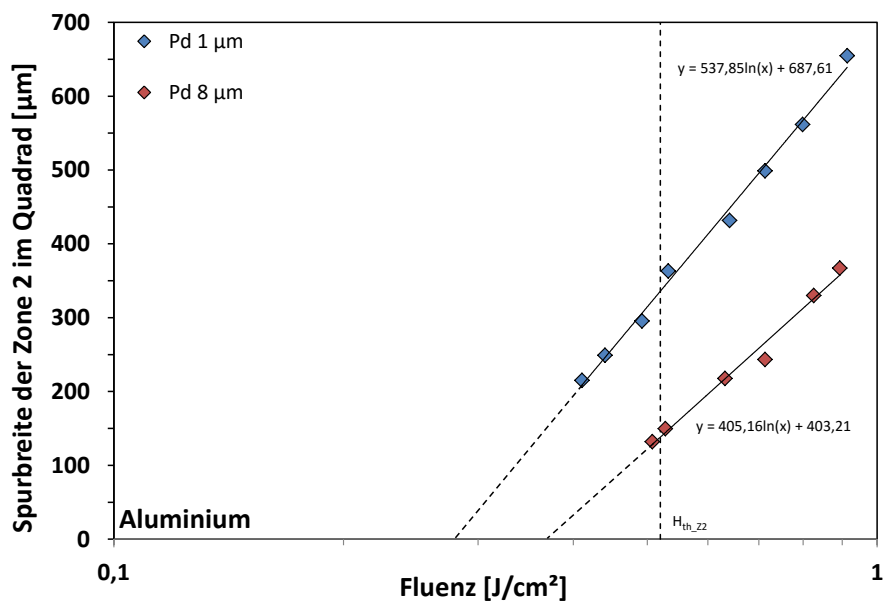


Abbildung 46 LIU-Plot für Aluminium, Quadrat der Spurbreite der Zone 2 gegenüber der zugehörigen logarithmisch aufgetragenen Fluenz, gestrichelte Linie ist Schwellfluenz der Zone 2 für Einzelpulse, Frequenz 32 kHz, Linienabstand 200 μm , Pulsdauer 200 fs

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 14.12.2015

.....

Tino Wagner